



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

**DRESDEN
concept**



Fakultät Maschinenwesen Institut für Verarbeitungsmaschinen und Mobile Arbeitsmaschinen

Professur Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik

Entwicklung und Umsetzung eines Moduls zur Inline-Faltenauswertung an Kartonziehteilen

Name, Vorname:

Meyer, Martin

geboren am:

30.09.1990

in:

Burgstädt

der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des ersten akademischen Grades

Diplomingenieur

vorgelegte Diplomarbeit.

Tag der Einreichung:

15.10.2015

1. Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak

2. Gutachter:

Dr.-Ing. Marek Hauptmann

Geheimhaltungsgrad:

-

Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak

Professur Verarbeitungsmaschinen/ Verarbeitungstechnik am Institut für
Verarbeitungsmaschinen und Mobile Arbeitsmaschinen



AUFGABENSTELLUNG FÜR DIE DIPLOMARBEIT

im Studiengang	Maschinenbau
Studienrichtung	Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik
Name des Diplomanden	MEYER, Martin
Thema:	Entwicklung und Umsetzung eines Moduls zur Inline-Faltenauswertung an Kartonziehteilen <i>„Development and Implementation of a Module for inline-examination of wrinkle-distributions on deep-drawn paperboard containers.“</i>
Kurzthema:	Inline-Faltenauswertungsmodul

Zielsetzung:

Beim Tiefziehen von Karton ist die Faltenverteilung an den Ziehteilen das entscheidende Qualitätskriterium. Für eine Anwendung im industriellen Maßstab ist eine automatisierte Faltenauswertung notwendig. Ein entwickeltes Analyseprogramm wurde bereits erfolgreich mit manuell aufgenommenen Daten getestet, jedoch noch nicht in eine sinnvolle Inline-Anwendung überführt.

Ausgehend von einer Recherche zum Stand der Technik in Industrie, Patenten und Wissenschaft soll in dieser Arbeit ein Messaufbau zur Gewinnung von Faltenanteilen entwickelt werden. Dabei ist das Messverfahren derart auszuwählen, dass eine zuverlässige Arbeitsweise des Auswertungsprogrammes sichergestellt wird. Das Faltenauswertungsmodul soll eine Inline-Auswertung ermöglichen. Dazu ist das Modul derart umzusetzen, dass kurze Mess- und Auswertungszeiten erreicht werden können. Die Auswertung soll für ein festgelegtes, rundes Ziehteilformat realisiert werden. Zur Umsetzung des Moduls sind alle notwendigen Komponenten auszuwählen und bis zum technischen Entwurf zu konstruieren. Die Einzelteile und -baugruppen sind zu montieren und in Betrieb zu nehmen. Anschließend ist die grundsätzliche Funktionsweise des Faltenauswertungsmoduls zu testen und schließlich im Zusammenspiel mit dem Tiefziehversuchsstand zu erproben. Die so ermittelten Faltenverteilungen sind mit geeigneten Referenzmessungen zu validieren.

Abschließend sind Vorschläge für die weitere Verbesserung des Auswertungsmoduls zu erarbeiten.

1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak
2. Gutachter:	Dr.-Ing. Marek Hauptmann
Betreuer der TU:	Dipl.-Ing. Tobias Müller

Ausgehändigt am:	15.06.2015
Einzureichen am:	15.10.2015

Prof. Dr.-Ing. J.-P. Majschak
Betreuender Hochschullehrer
Studienrichtungsleiter

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	VI
Abstract	VII
Formelverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	2
2.1 Tiefziehen von Karton	2
2.1.1 Aufbau des Ziehprozesses	2
2.1.2 Einflussfaktoren beim Ziehen von Karton	3
2.1.3 Qualitätsmerkmale tiefgezogener Kartonformteile	4
2.2 Messverfahren zur Bestimmung der Faltenanzahl und –verteilung.....	6
2.2.1 Inline- und Online-Messmethoden	6
2.2.2 Lasertriangulation	6
2.2.3 Konfokale Abstandssensoren	7
2.2.4 Methoden der Bildverarbeitung	8
2.3 Datenfilterung und Methoden der Datenauswertung.....	11
2.3.1 Charakterisierung von Messmethoden und deren Ergebnissen.....	11
2.3.2 Methoden zur Datenfilterung	12
2.3.3 Fehlerquellen bei der Datenaufbereitung.....	13
2.3.4 Zählverfahren für regellose Schwingungen.....	16
3 Präzisierte Aufgabenstellung	19
4 Zielsetzung und Lösungsweg.....	20
5 Auswahl einer geeigneten Vorzugsvariante.....	21
5.1 Analyse des Messsystems	21
5.1.1 Anforderungen an das Auswertungsmodul	21

5.1.2	Funktionsmodellierung des Messablaufs.....	22
5.2	Kriterien für Messmethoden zur Inline-Messung am Anwendungsfall	23
5.3	Vergleich der Sensorsysteme im Hinblick auf die Inline-Messung	24
5.4	Bildung geeigneter Lösungsvarianten	25
5.5	Auswahl der Vorzugsvariante.....	29
6	Hardwareseitige Entwicklung des Auswertungsmoduls	30
6.1	Gliederung in Module	30
6.2	Auswahl und Gestaltung der Hardware-Komponenten.....	30
6.2.1	Kamerasystem.....	30
6.2.2	Beleuchtung	33
6.2.3	Stützsystem	34
6.2.4	Hüllsystem	36
6.3	Ausrichtung und Kalibrierung der Hardware	36
7	Softwareseitige Umsetzung des Gesamtsystems	39
7.1	Strukturierung der Softwarekomponenten	39
7.1.1	Grundlegender Aufbau der Module.....	39
7.1.2	Grafische Benutzeroberfläche.....	40
7.1.3	Ansteuerung des Kamerasystems	40
7.1.4	Datenauswertung und –speicherung	41
7.1.5	Import von Daten der Versuchsstandsteuerung.....	41
7.2	Neuentwicklung des Analysealgorithmus	42
7.2.1	Motivation zur Neuentwicklung.....	42
7.2.2	Ausgleich der Beleuchtungsunterschiede	43
7.2.3	Mustersuche anhand des Modells einer idealen Falte	44
7.2.4	Herleitung der Korrekturfunktion	48
7.3	Die Versuchsanwendung als Gesamtsystem.....	49

8	Verifizierung und Validierung des Faltenauswertungsmoduls	52
8.1	Verifizierung	52
8.2	Validierung	52
8.2.1	Validierungsziel	52
8.2.2	Validierungsmethoden	53
8.2.3	Ergebnisse der Validierung.....	57
8.3	Fehlerdiskussion	57
9	Weiterführende Untersuchungen zum Analyseverhalten anhand praxisnaher Beispiele ...	60
9.1	Motivation zur weiterführenden Untersuchung.....	60
9.2	Analyse weiterer Ziehteilgeometrien und Materialien	60
9.3	Grenzen des Inline-Faltenauswertungsmoduls.....	62
10	Vorschläge zur technischen Verbesserung des Auswertungsmoduls.....	63
10.1	Verbesserung der Sensitivität durch Anpassung der Beleuchtung	63
10.1.1	Motivation zur Änderung des Beleuchtungssystems.....	63
10.1.2	Lösungsvorschläge für die Beleuchtungssteuerung.....	63
10.1.3	Kostenabschätzung der Lösungsvarianten.....	64
10.2	Automatische Kamerazuordnung	64
10.3	Perspektiven für eine Umsetzung im industriellen Maßstab.....	65
11	Schlussbemerkungen und Ausblick	66
12	Zusammenfassung	69
	Eidesstattliche Erklärung.....	70
	Thesen	71
	Literaturverzeichnis	72
	Abbildungsverzeichnis	77
	Tabellenverzeichnis	79
	Anlagenverzeichnis.....	80

Kurzreferat

Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung und Validierung eines Inline-Faltenauswertungsmoduls zur Auswertung der Faltenverteilung an gezogenen Kartonformteilen im Prozess zum Ziel. Ein entsprechend konstruierter Versuchsaufbau ermöglicht die dafür notwendigen Bilddaten innerhalb des Ziehprozesses zu akquirieren und annähernd in Echtzeit auszuwerten.

Durch den Ausgleich der graduellen Beleuchtung kann unter Anwendung eines zweidimensionalen Frequenzfilters eine Kontrastoptimierung zwischen Falten und Hintergrund erreicht werden, die die Auswertung der Daten begünstigt. Mittels Kreuzkorrelation mit einem Faltenmodell kann so die Position von Falten in Bildausschnitten lokalisiert werden. Dieser neuartige Ansatz ermittelt Falten nicht nur punktuell, sondern bezieht auch die Umgebung eines Pixels in die Analyse ein. Dadurch wird eine differenzierte Klassifizierung erreicht, die robust gegenüber Bildfehlern und Rauschen ist.

Eine Korrekturfunktion berücksichtigt die durch die Abbildung der runden Zarge auf die Fokusebene resultierenden Positionsabweichungen und macht die Falten einer photogrammetrischen Messung zugänglich. So lassen sich mittlere Faltenabstände und deren Standardabweichungen ermitteln, die einem Vergleich mit Referenzmessmethoden standhalten. Mit Hilfe statistischer Tests kann gezeigt werden, dass vor allem aus hohen Faltenhalterkräften, und demzufolge feinverteilten Falten, größere Abweichungen zwischen dem Inline-Faltenauswertungsmodul und der Referenzmessmethode resultieren. Eine Fehlerdiskussion legt verschiedene Gründe für dieses Verhalten dar.

Weiterführende Untersuchungen weisen die prinzipielle Eignung des Verfahrens für abweichende Geometrien und Materialien nach, zeigen jedoch auch Grenzen des eingesetzten Systems auf. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden Verbesserungsansätze vorgeschlagen, die die Limitierungen der entwickelten Methode reduzieren können.

Martin Meyer

Abstract

The present thesis includes the development and validation of a module for inline-examination of wrinkle-distribution on deep-drawn paperboard containers within the deep drawing process. A suitably constructed test-device allows to acquire the necessary images within the process and their approximately real-time evaluation.

The usage of a two-dimensional frequency-filter accomplishes a contrast optimization between wrinkles and background by the compensation of a gradual illumination, which supports the evaluation of the wrinkles. Through the cross-correlation with a wrinkle-model, the position of wrinkles in image segments can be determined. This novel approach not only determines the wrinkles in a punctual way, but also it includes the environment of pixels. In this way a differentiating classification is possible, which is sturdy against image errors and noise.

A correcting function considers the position errors caused by the mapping of the round frame of the deep-drawn paperboard container to the focal plane and makes the wrinkles available for a photogrammetric measurement. In this way averaged wrinkle-distances and their standard deviation can be determined that withstands the comparison with certain reference measuring methods. By statistical tests can be shown, that especially high blankholder forces and therefor small wrinkles result in higher differences between the inline-examination-module and the reference measuring method. An error discussion explains various reasons for this behavior.

Further tests prove the general suitability of the method for different geometries and materials, but also show limits of the applied system. Based on the gained knowledge, approaches for optimization are discussed that may improve the developed method.

Martin Meyer

Formelverzeichnis

lateinische Buchstaben¹

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
b	Pixel	Bogenlänge
B_i	-	Bewertung des i-ten Kriteriums
$C_{1-\alpha/2;nx;ny}$	-	Testschranke für den Wilcoxon-Test
D	Pixel	Verzeichnungsmatrix, engl. distortion
$d_{\text{Auflösung}}$	mm	kleinster auflösbarer Abstand
D_{Bild}	-	Helligkeit
$d_{x,y}$	Pixel	Verzeichnung am Punkt (x, y), engl. distortion
f	-	Freiheitsgrad
f_A	Hz	Abtastfrequenz
F_{FH}	N	Faltenhalterkraft
f_{\max}	Hz	höchste im Signal vorkommende Frequenz
f_n	-	Anzahl falsch negativ klassifizierter Testergebnisse
f_p	-	Anzahl falsch positiv klassifizierter Testergebnisse
F_{FH}	N	Faltenhalterkraft
F_{ST}	N	Stempelkraft
G	-	Grauwertmatrix
G_{Gauß}	-	2D Gauß - Filtermaske
G_{ij}	-	Grauwert an der Stelle (i, j), Element der Grauwertmatrix G
H_0	-	Nullhypothese
H_1	-	Gegenhypothese
h_z	mm	Zargenhöhe
i	-	Index
j	-	Index
k_3	-	Koeffizient bei der Verzeichnungskorrektur
k_ϵ	-	Korrekturfaktor für Faltenposition
$M(x)$	-	Median einer Stichprobe x
n	-	Anzahl der Pixel im Musterbild
n_F	-	Faltenanzahl

¹ **Hinweis zur Notation:** Fettgedruckte Formelzeichen stellen einen Vektor oder eine Matrix dar. Nicht fettgedruckte Formelzeichen sind skalare Werte.

P_F	-	reale Faltenposition
\hat{P}_F	-	scheinbare Faltenposition
P'_F	-	korrigierte Faltenposition
P_H	-	Kamerahauptpunkt
P_K	-	Position des Kamerabrennpunktes
R^2	-	Bestimmtheitsmaß der linearen Regression
r_n	-	Anzahl richtig negativ klassifizierter Testergebnisse
r_p	-	Anzahl richtig positiv klassifizierter Testergebnisse
R_{ST}	-	normierte Kreuzkorrelationsfunktion
R_{xy}	-	Résaupunkt an den Koordinaten (x, y)
r_{ZT}	mm	Ziehteilradius
S_{Bild}	-	Sättigungsstufe
S	-	Quellbild, engl. source image
s	-	Stichprobenstandardabweichung
\bar{S}	-	arithmetischer Mittelwert des Quellbildes
s_0	mm	Kartondicke
s_K	mm	Abstand der Fokusebene zur Kamera
T	-	Musterbild, engl. template
\bar{T}	-	arithmetischer Mittelwert des Musterbildes
$t_{1-\alpha}$	-	Wert der t-Verteilung zur Irrtumswahrscheinlichkeit α
t_A	s	Analysezeit
t_M	s	Dauer zur Messwerterfassung
T_S	°C	Stempeltemperatur
T_{ZB}	°C	Ziehbuchsentemperatur
U	mm/Pixel	Auflösung
UT	s	Haltezeit
v_z	mm/s	Ziehgeschwindigkeit
w	Pixel	scheinbare Faltenposition
\tilde{w}	Pixel	korrigierte Faltenposition
W_i	-	Wichtung des i-ten Kriterium
\hat{W}_i	-	normierte Wichtung des i-ten Kriterium
x_0	Pixel	Nullpunktverschiebung
\bar{x}_F	mm	mittlerer Faltenabstand
\bar{y}	-	Mittelwert der Mittelwertdifferenzen zweier Versuchspläne

griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
α	°	Rückstellwinkel
$\alpha_{95,0\%}$	-	95 % - Konfidenzgrenze
Δx	Pixel	Abstand zwischen Kamera- und Bildkoordinatensystem
ε	Pixel	Fehler der scheinbaren Faltenposition
Θ	-	Schwellwert für Kreuzkorrelationskoeffizienten
μ	-	Mittelwert der Grundgesamtheit einer Stichprobe
Σ	-	Summe, allgemein
σ_F	μm	Standardabweichung der Faltenabstände
$\sigma_{S \text{ bzw. } T}$	-	Standardabweichung des Quell- (S) bzw. Musterbildes (T)
σ_{ST}	-	Kovarianz zwischen S und T
τ	Pixel	Verschiebung zwischen Quell- und Musterbild in x-Richtung
u	Pixel	Verschiebung zwischen Quell- und Musterbild in y-Richtung
φ	°	zur Faltenposition gehöriger Winkel
ψ	°	Betrachtungswinkel

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ADC	Analog-Digital-Wandler, engl. analog-digital converter
bspw.	beispielsweise
BVSK	Bildverarbeitung der Schnittkante
CD	Querrichtung des Karton senkrecht zu MD, engl. cross direction
CPS	cyber - physisches System
DFT	diskrete Fourier - Transformation
DLL	dynamische Programmbibliothek, engl. dynamic link library
F	Forderung
FFT	schnelle Fourier - Transformation, engl. fast fourier transformation
Full HD	volle Hochauflösung, engl. full high definition
GPIO	Allzweckeingabe/-ausgabe, engl. general purpose input/output
Gw	Gewicht
k. A.	keine Angabe
KAM	konfokale Abstandsmessung
LAN	lokales Netzwerk, engl. local area network
LED	Leuchtdiode, engl. light-emitting diode
LT	Lasertriangulation
max	Maximum, maximal
MD	Maschinenlaufrichtung des Karton, engl. machine direction
min	Minimum, minimal
MKS	Mehrkamerasystem
ODBC	offene Datenbankverbindungsfähigkeit, engl. open database connectivity
OOP	objektorientierte Programmierung
OPC	Open Platform Communications
OPS	optischer Positionssensor
PBV	Bildverarbeitung des Zargenpanoramas
px	Pixel
SD-Karte	sichere digitale Speicherkarte, engl. secure digital memory card
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Datenbanksprache zur Manipulation relationaler Datenbanken
TCP/IP	Übertragungssteuerungsprotokoll/Internet Protokoll, engl. transmission control protocol/internet protocol

UI	Benutzerschnittstelle, engl. user interface
UML	schematische Darstellung von Programmstrukturen, engl. unified modelling language
USB	ein serielles Bussystem, engl. universal bus system
W	Wunsch
WLAN	drahtloses lokales Netzwerk, engl. wireless local area network

1 Einleitung

Durch das steigende Bewusstsein für die Notwendigkeit ökologischer Verpackungslösungen seitens der Produzenten, wie auch der Konsumenten, kann sich eine zunehmende Anzahl an Verpackungen aus Karton am Markt etablieren [1, 2]. Das Thema Nachhaltigkeit entwickelt sich infolgedessen zu einem immer bedeutenderen Marketinginstrument [3, S. 10ff].

Insbesondere durch Ziehen hergestellte Kartonverpackungen können die günstigen Eigenschaften von Karton bezüglich der Eignung als Verpackung sowie deren Umweltfreundlichkeit kombinieren und sind somit in der Lage, unter bestimmten Voraussetzungen Kunststoffverpackungen zu ersetzen [4]. Eine qualitative Beurteilung der Ziehteile kann unter anderem durch die Auswertung der Falten sowie deren Verteilung in der Zarge erfolgen [5, S. 65ff].

Derzeitige technische Umsetzungen zur Analyse der Falten von Kartonformteilen bedienen sich verschiedener Sensorik oder Methoden der Bildverarbeitung und sind in der Lage zuverlässige Untersuchungsergebnisse bereitzustellen. Durch die aufwändige Vorbereitung der Proben gestalten sich diese Untersuchungen indes sehr zeitintensiv und weisen nur eine geringe Flexibilität bezüglich geometrischer Variationen der Ziehteile auf.

Bisher konnte die Beurteilung der Ziehteile ausschließlich ex situ erfolgen. Die Inline-Messung der Qualitätskenngrößen stellt daher einen erheblichen Fortschritt in der Prozessüberwachung dar und bietet gleichzeitig neue Möglichkeiten zur Prozesssteuerung. Im Rahmen der Entwicklungen von Industrie 4.0 können die inline gewonnenen Daten Grundlage für die Schaffung neuer Dienste, beispielsweise intelligenter Assistenzsysteme, sein und die flexible Reaktion auf veränderliche Produktionsbedingungen sowie die Kontrolle kritischer Muster gestatten [6, 7].

Für die kontinuierliche Optimierung des Prozessverhaltens ist die Verfügbarkeit einer aktuellen, aber auch historischen Datengrundlage von hoher Relevanz. Jedoch steht bisher kein geeignetes Werkzeug zur Verfügung, das die Erfassung und Speicherung von Qualitätskenngrößen in Echtzeit erlaubt.

Der Zuwachs an Flexibilität, die potenzielle Prozessoptimierung und die erhebliche Zeitersparnis bei der Versuchsdurchführung rechtfertigen den Aufwand für die Entwicklung eines Moduls zur Inline-Messung von Qualitätskenngrößen an Kartonziehteilen. Gegenüber bisherigen Messmethoden für die Faltenverteilung entsteht durch die Messung im Prozess ein deutlicher Wettbewerbsvorteil im Hinblick auf die industrielle Verpackungsherstellung, der zu einer günstigeren Positionierung von tiefgezogenen Kartonverpackungen am Markt beitragen kann.

2 Stand der Technik

2.1 Tiefziehen von Karton

2.1.1 Aufbau des Ziehprozesses

Aus der Fertigungstechnik ist das Ziehen von Metallblechen bekannt. Der Aufbau des Prozesses beim Ziehen von Karton ist diesem sehr ähnlich. Der Stempel drückt einen Kartonzuschnitt mit der Stempelpkraft F_{ST} durch die Ziehbuchse und formt diesen dabei dreidimensional um [8, S. 481].

Abbildung 2.1 zeigt diesen Prozess schematisch in zwei Varianten. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Versuchsstand und die beiden Prozessvarianten sind in **Anhang A** beschrieben.

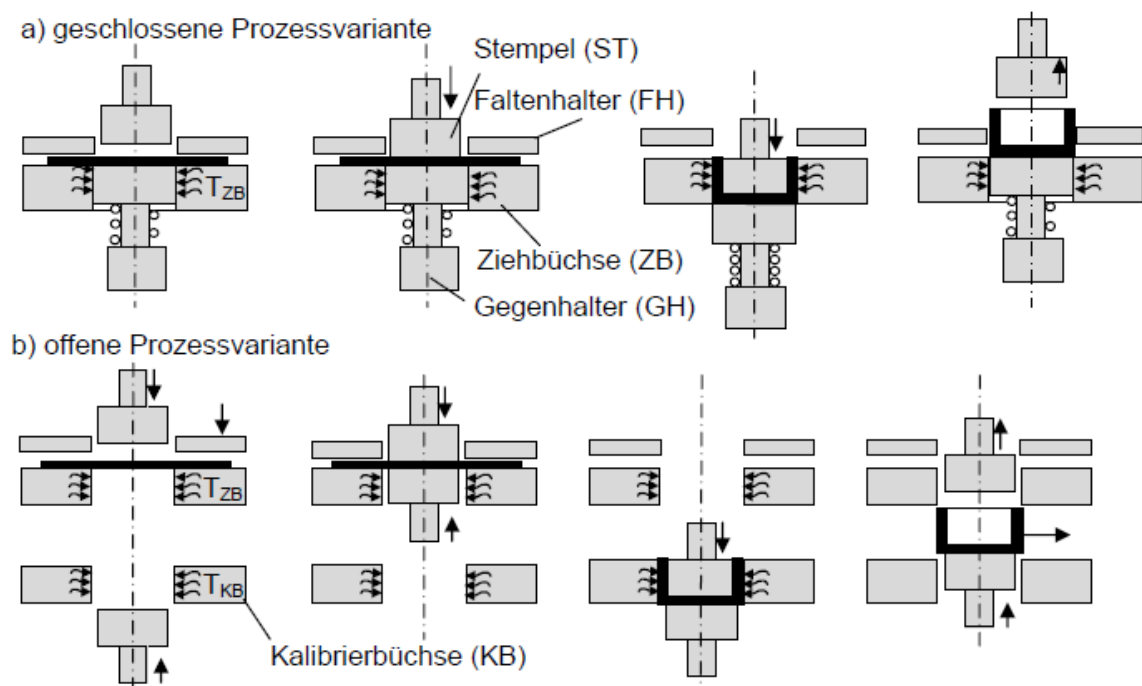


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des Ziehprozesses von Karton nach [5]

Durch die mangelnde Fließfähigkeit des Kartons kommt es im Gegensatz zur Metallumformung zu einem Materialüberschuss im Zuschchnitt (vgl. **Abbildung 2.2**), der sich durch Faltenbildung im Bereich der Zarge des Ziehteils auswirkt. Aufgrund des Spannungsabbaus kommt es beim Ziehvorgang zu Aufwölbungen im Zuschchnitt, die durch den Faltenhalter niedergehalten werden. Dieser presst den Zuschchnitt mit einer definierten Kraft F_{FH} auf die Ziehbuchse. Die auf diese Weise entstehenden Falten werden schließlich im Spalt zwischen Stempel und Ziehbuchse verpresst. Die Beheizung des Stempels und der Ziehbuchse ist der Verbesserung des Umformverhaltens

förderlich, da so die Größe des Spaltes beeinflusst werden kann und die Verpressung begünstigt wird.

Durch den Faltenhalter werden die entstehenden Falten bereits verteilt. Kleine, feinverteilte Falten gelten hierbei als Qualitätskriterium. Neben optischen Kriterien und der erhöhten Formstabilität des Ziehteils begünstigt ein feinverteiltes Faltenbild die notwendigen Prozesskräfte [5, S. 89].

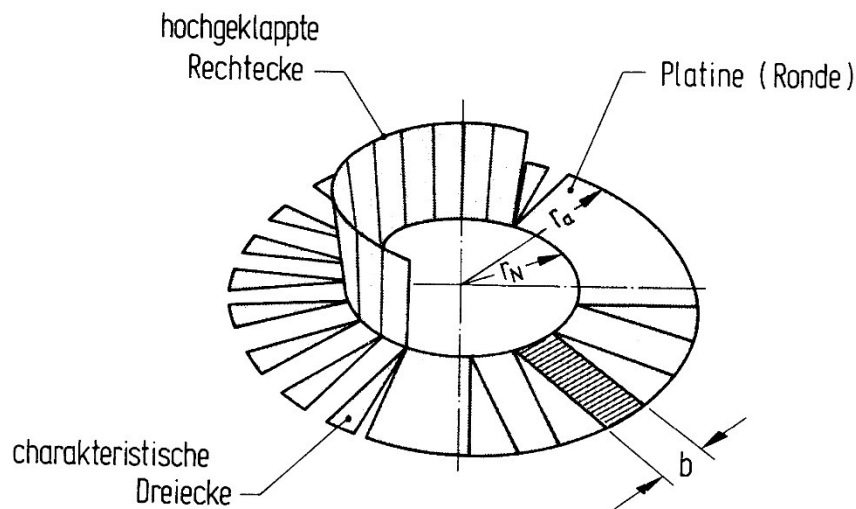


Abbildung 2.2: Materialüberschuss im Zuschnitt beim Ziehen [9]

Die Verteilung und Anzahl der Falten in der Zarge des Ziehteils kann durch verschiedene Verfahren und Prozessgrößen beeinflusst werden. So wird insbesondere die Optimierung der Einstellgrößen zur Verbesserung des Faltenbildes angewendet. Jedoch existieren auch Bestrebungen die Faltenbildung durch strukturelle Änderungen des Ziehprozesses zu erreichen. Beispielsweise kann eine „Mikroriffelung“ des Stempels das Aufbrechen großer Falten in viele kleinere bewirken [10]. Wird der Stempel während des Ziehvorganges durch Ultraschall in Schwingung versetzt, kann ebenfalls eine Verbesserung des Faltenbildes beobachtet werden [11].

2.1.2 Einflussfaktoren beim Ziehen von Karton

Die erreichbare Qualität der Ziehteile wird vor allem durch die Faltenhalterkraft, die Temperatur des Stempels und der Ziehbuchse, sowie die Größe des Ziehspaltes bestimmt. Durch eine Abstimmung dieser Prozessparameter kann eine Optimierung der Qualität der Ziehteile erreicht werden. Jedoch wird der Prozess sowohl von Umweltbedingungen, wie Lufttemperatur und -feuchte, als

auch von der im Karton enthaltenen Feuchte beeinflusst. Zudem wirkt sich ebenfalls die Oberflächenrauheit der beteiligten Bauteile auf das Umformergebnis aus.

Eine mangelhafte Abstimmung der Prozessparameter kann zu einer groben Faltenstruktur oder schlimmsten Falls zur Zerstörung des Ziehteils führen. Die qualitätsgerechte Herstellung von Ziehteilen ist nur durch eine gute Verpressung der Falten im Ziehspalt möglich. Eine zu geringe Verpressung der Falten kann neben groben Falten zu sehr hohen Reibkräften im Ziehspalt führen, die die Prozesskräfte erhöhen und in Rissbildungen im Ziehteil resultieren können.

2.1.3 Qualitätsmerkmale tiefgezogener Kartonformteile

Formhaltigkeit

Der Abbau von Eigenspannungen im Ziehteil führt nach dem Ziehen zu einer Rückstellung der Zarge. Zur Beurteilung der Formhaltigkeit wird der Rückstellwinkel herangezogen, der durch Fotografien des Ziehteils in MD und CD ausgewertet wird [5, S. 46f]. Hierbei wird der Winkel zwischen der idealen Zylinderform und der Ist-Geometrie unter Zuhilfenahme einer Grafiksoftware manuell gemessen. Die Reproduzierbarkeit der Rückstellwinkel sowie eine kleine Rückstellung und damit eine hohe Formhaltigkeit sind insbesondere für die Rationalisierungsfunktion der Verpackung wichtig [4, S. 22].

Formstabilität

Die Formstabilität wird durch eine hohe Verpressung der Falten begünstigt, wodurch die Widerstandsfähigkeit gegen „mechanische [...] Belastung und menschliche Einwirkung“ [4, S. 18f] erhöht wird. Demnach schützt eine formstabile Verpackung das Produkt vor äußeren Einwirkungen beim Transport und der Distribution. Folglich ist die Formstabilität ein wichtiges Maß für die Erfüllung der Schutzfunktion der Verpackung.

Die Kraft, die für das Aufspreizen des Ziehteils notwendig ist, kann als Maß für die Formstabilität herangezogen werden [12]. Dafür werden mit einer an die geometrischen Gegebenheiten angepassten Vorrichtung die Falten entgegen ihrer Umformrichtung aufgespreizt und die dafür nötige Kraft gemessen. Jedoch existiert keine einheitliche Vorschrift zur Beurteilung der umgeformten Ziehteile bezüglich ihrer Formstabilität. Insbesondere haben die vorhandenen Verfahren zur Bestimmung der Formstabilität den Nachteil, dass das Ziehteil bei der Prüfung zerstört wird.

Sensorische Qualitätsmerkmale

Die Anzahl n_F der Falten auf der Zarge ist mit deren Größe korreliert. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass eine hohe Faltenanzahl kleine Falten zur Folge hat. Vice versa bedeutet das, dass Ziehteile mit wenigen Falten eher grobe Faltenstrukturen aufweisen. Ferner sind der mittlere Faltenabstand \bar{x}_F sowie die Standardabweichung σ_F der Einzelfaltenabstände als Maß für die Streuung bzw. Gleichmäßigkeit der Abstände von Bedeutung.

Die Größe und Verteilung der Falten auf der Zarge ist für den Anwender eines tiefgezogenen Kartonbechers direkt durch die Optik der Verpackung ersichtlich und wirkt sich in erster Linie auf die Kommunikationsfunktion der Verpackung aus. Kleine, kaum sichtbare Falten erwecken dabei das Gefühl einer hochwertigen Verpackung.

Überdies wird auch die Haptik der Verpackung positiv durch eine hohe Anzahl gleichmäßig verteilter Falten beeinflusst. Aus der Sicht des Produktmarketing sind sensorische Eigenschaften (bspw. Optik und Haptik) der Verpackung ein wichtiges Werkzeug, um beim Kunden Emotionen für das Produkt zu wecken und die Wertigkeit des Produktes zu verbessern [3, S. 12ff].

Da Blasenbildung oder Risse die Zerstörung des Ziehteils implizieren, werden diese bei der sensorischen Qualitätsbeurteilung vernachlässigt. Verfärbungen auf der Zarge können zudem die Kommunikationsfunktion negativ beeinflussen. Es ist daher anzustreben, Parameterkombinationen zu finden, bei denen die Entstehung von Verfärbungen vermieden wird.

Das Faltenbild als wichtigstes Qualitätskriterium

Wie gezeigt werden konnte, hat das Faltenbild, bestehend aus Faltenanzahl n_F , mittlerer Faltenabstand \bar{x}_F und Standardabweichung des mittleren Faltenabstandes σ_F , eine große Bedeutung für die Qualität tiefgezogener Kartonformteile. So können beispielsweise Aussagen zur Formstabilität aus dem Faltenbild abgeleitet werden. Des Weiteren werden die sensorischen Eigenschaften der Verpackung maßgeblich durch die Falten bestimmt. Die Erfüllung der Schutz- und Kommunikationsfunktion der Verpackung werden demnach entscheidend vom Faltenbild beeinflusst. Daher wurden bereits verschiedene Ansätze zur Bestimmung des Faltenbildes entwickelt, von denen nachfolgend eine Auswahl vorgestellt wird.

2.2 Messverfahren zur Bestimmung der Faltenanzahl und –verteilung

2.2.1 Inline- und Online-Messmethoden

Unabhängig vom Gegenstand der Messung sind die zur Messung eingesetzten Methoden in Online- und Inline-Verfahren zu unterscheiden. Oehme und Jola definieren Online-Messungen folgendermaßen:

„Bei der Online-Messung wird dem Produktstrom stetig eine Probe durch eine Probenahmeverrichtung entnommen und dem Messgerät zugeführt. [...] Die Online-Messung zeichnet sich gegenüber der Inline-Messung durch ein schlechteres Übergangszeitverhalten aus.“ [13, S. 105]

Zur Abgrenzung von Online-Messungen ist die Inline-Messung von Kenngrößen eines Produktstromes wie folgt definiert:

„Bei der Inline-Messung wird ein Messwertgeber direkt in den Produktstrom eingebaut [...]. Der Einbau kann dabei im Hauptstrom oder Nebenschluss erfolgen.“ [13, S. 64]

Demnach kommt ein Inline-Messverfahren ohne eine Einrichtung aus, die eine Probe aus dem Produktstrom entnimmt. Die hergestellten Ziehteile sind folglich als Produktstrom zu definieren, an dem Messungen vorgenommen werden. Wird der Produktstrom nach dem Ziehen aufgeteilt, kann eine Messung an ausgewählten Ziehteilen im Nebenschluss stattfinden, andernfalls wird von einer Messung im Hauptstrom gesprochen. Nachfolgend werden verschiedene Messmethoden vorgestellt, für die bisher nur eine Methode zur Online-Messung realisiert wurde.

2.2.2 Lasertriangulation

Bei der Lasertriangulation wird ein Laserpunkt auf die Oberfläche des Messobjektes – in diesem Kontext die Zarge eines Ziehteils – projiziert und durch einen optischen Positionssensor (OPS) beobachtet [14, S. 344f]. Eine Linse fokussiert dabei den projizierten Laserpunkt auf den Positionssensor. Ändert sich der Abstand zwischen dem Lasertriangulationssensor und dem Messobjekt, ändert sich auch der Winkel, unter dem der Laserpunkt beobachtet wird und infolgedessen die Position des Laserpunktes auf dem Positionssensor. Durch die geometrischen Gegebenheiten des Strahlenganges kann aus der durch den OPS detektierten Position und dem Betrachtungswinkel auf die Entfernung zum Messobjekt geschlossen werden.

Bisherige Umsetzungen dieses Messprinzips zur Ermittlung des Faltenbildes sehen einen starren Lasertriangulationssensor vor, der die Oberfläche eines rotierenden Ziehteils vermisst (Abtastfrequenz: 10 kHz, Drehfrequenz des Ziehteils: 10 Hz) [15]. So lässt sich ein Signal gewinnen, welches die Falten als Signalspitzen abbildet. Aufgrund der von der idealen Zylinderform abweichenden Ziehteilgeometrie ist dieses Signal von einem niederfrequenten Anteil überlagert, welcher den Einsatz von Frequenzfiltern notwendig macht.

Durch die hohe Auflösung der Entfernungsmessung können bereits Unebenheiten der Ziehteiloberfläche sowie Motorvibrationen Störanteile in das Signal einbringen, die gegebenenfalls vor der Auswertung des Signals beseitigt werden müssen. Durch die maximal mögliche Abtastfrequenz ist diesem Messprinzip eine Schranke bezüglich der erreichbaren Zeit für die Datengewinnung bei gegebener Datenqualität gesetzt.

2.2.3 Konfokale Abstandssensoren

Beim Einsatz chromatisch konfokaler Sensoren wird die Oberfläche des Messobjektes über ein Linsensystem mit starker Längsaberration mittels einer breitbandigen Lichtquelle beleuchtet und das zurückgeworfene Licht auf einen chromatischen Sensor abgebildet [16, S. 701f]. Durch den wellenlängenabhängigen Brechungsindex von Glas bilden sich entlang der optischen Achse Brennpunkte aus, deren Entfernungen von der Linse ebenfalls von der Wellenlänge des einfallenden Lichts abhängig sind. Befindet sich die Oberfläche des Messobjektes im Brennpunkt einer bestimmten Wellenlänge, wird das Licht jener Wellenlänge mit der größten Intensität zurückgeworfen und von dem chromatischen Sensor erfasst. Aus der Zuordnung des Intensitätsmaximums zu einer Wellenlänge kann im Umkehrschluss auf den Abstand des entsprechenden Brennpunktes und somit auf die Entfernung des Linsensystems zur Messobjektoberfläche geschlossen werden.

Eine technische Umsetzung der Faltenbestimmung mittels chromatisch konfokaler Sensoren sieht jeweils einen Sensor für die Außen- sowie die Innenseite der Zarge vor [17]. Ähnlich der technischen Umsetzung der Lasertriangulationsmessung, dreht sich die Ziehteilprobe um ihre Achse. Bedingt durch die feste Lage der Brennpunkte sind die Sensoren auf einer weiteren Achse radialer Richtung zum Ziehteil beweglich, damit die Abweichung der Zargenoberfläche von der Sollgeometrie ausgeglichen werden kann. Zu Versuchszwecken wurden die Proben jedoch durch ein weiteres Bauteil in eine annähernd kreisrunde Form gezwungen [17, S. 17].

Für diese konkrete Realisierung konnten Zeiten von ca. 40 s pro Probe für die Messwerterfassung erreicht werden [17, S. 17]. Durch die besonderen optischen Eigenschaften von Karton, wie die teilweise Lichtdurchlässigkeit, ist die Messung durch chromatisch konfokale Sensoren fehleranfällig. So können bei einer Messung mehrere Abstände gleichzeitig ermittelt werden, was die Messung unbrauchbar macht. Durch eine geeignete Kombination von Probendrehzahl und Abtastfrequenz können jedoch brauchbare Messungen erzielt werden. Auch bei diesem Verfahren müssen niederfrequente Anteile sowie Störungen durch Filterung beseitigt werden.

2.2.4 Methoden der Bildverarbeitung

Bildgewinnung

Digitale Bilder werden durch Digitalkameras gewonnen, wobei ein 3-dimensionales Objekt auf einem 2-dimensionalen Sensor abgebildet wird. Ausgehend von der Aufnahme von Grauwertbildern wird die Intensität des vom Objekt zurückgeworfenen Lichts eines bestimmten Objektbereichs auf eine Zahl $g \in \mathbb{N}$ abgebildet. Üblicherweise werden zur Kodierung der Grauwerte 8 bit verwendet², das heißt, ein Bildbereich wird auf $g = \{0, \dots, 255\}$ abgebildet. Für Farbbilder werden diese Informationen in drei getrennten Kanälen (rot, grün und blau) gespeichert. Die Abbildung eines digitalen Bildes kann als Grauwertmatrix $\mathbf{G} \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ repräsentiert werden, wobei jedes Matrixelement \mathbf{G}_{ij} einen Bildabschnitt, das sogenannte Pixel, darstellt. Die Menge aller durch \mathbf{G} repräsentierten Punkte wird Bildbereich genannt. **Abbildung 2.3** verdeutlicht die bereichsweise Zusammenfassung der Objektoberfläche und deren Abbildung auf die Grauwertmatrix durch ein konstruiertes Beispiel anhand eines graduellen Grauwertverlaufs. Abhängig von der Beleuchtung des Objekts kann eine Objektoberfläche unterschiedlich hell erscheinen. Dies äußert sich in einer Änderung der Grauwerte. Durch eine Überbelichtung eines bestimmten Bildbereichs können lokal die Kontraste zwischen einzelnen Pixeln sehr gering erscheinen.

² Technisch sind aber auch höhere Grauwertaufösungen möglich, so werden bspw. auch 10 oder 12 bit zur Kodierung angewendet [18, S. 12].

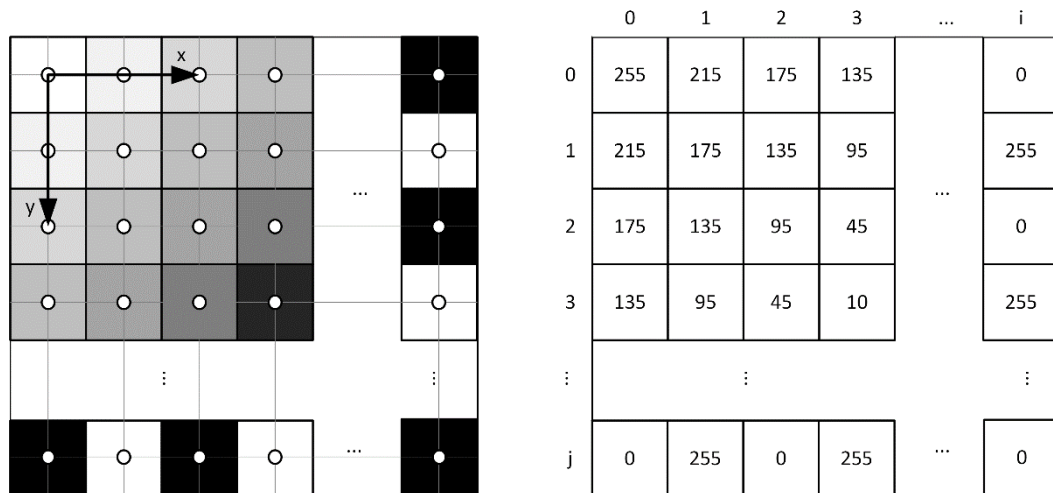


Abbildung 2.3: Objektabbildung auf die Grauwertmatrix

Für die Abbildung der Helligkeiten wird der Durchschnitt eines Abschnitts auf ein Element der Grauwertmatrix abgebildet. Je größer ein Bereich ist, der auf ein Element in der Grauwertmatrix abgebildet wird, desto kleiner ist die Auflösung der Kamera [19, S. 135f]. Die Auflösung beschreibt somit den minimalen Abstand $d_{\text{Auflösung}}$ zweier getrennt darstellbarer Punkte auf der Objektoberfläche. Die Kameraauflösung lässt sich demnach durch **Gleichung (1)** berechnen.

$$U = \frac{1}{d_{\text{Auflösung}}} \quad (1)$$

Wie in **Abbildung 2.3** dargestellt, wird das linkshändige Bildkoordinatensystem üblicherweise in die linke obere Ecke des Bildes gelegt. Durch diese Konvention kann das Bildkoordinatensystem unter Umständen vom Objektkoordinatensystem abweichen. Somit müssen die Koordinatensysteme gegebenenfalls durch Translation des Koordinatenursprungs und Rotation um diesen ineinander überführt werden [20, S. 78f]. Die z-Koordinate steht dabei jeweils senkrecht auf der Bildebene.

Die Objektkoordinaten \mathbf{P} entstammen in der Regel einem 3-dimensionalen Raum. Enthält der Bildbereich ausschließlich Punkte, die in einer zur Fokusebene parallelen Ebene liegen, kann durch den Strahlensatz gezeigt werden, dass die x- und y-Koordinaten durch eine Skalierung in beide Richtungen in das Bildkoordinatensystem umgerechnet werden können.

Bildauswertung

Prinzipiell unterscheiden sich die Methoden zur Bildauswertung des Faltenbildes durch die Richtung, aus der das auszuwertende Bild aufgenommen wird. Falten lassen sich sowohl auf der

Mantelfläche eines Ziehteils erkennen als auch in der Ebene der Schnittkante durch die Zarge.

Abbildung 2.4 zeigt die beiden Herangehensweisen im Vergleich.

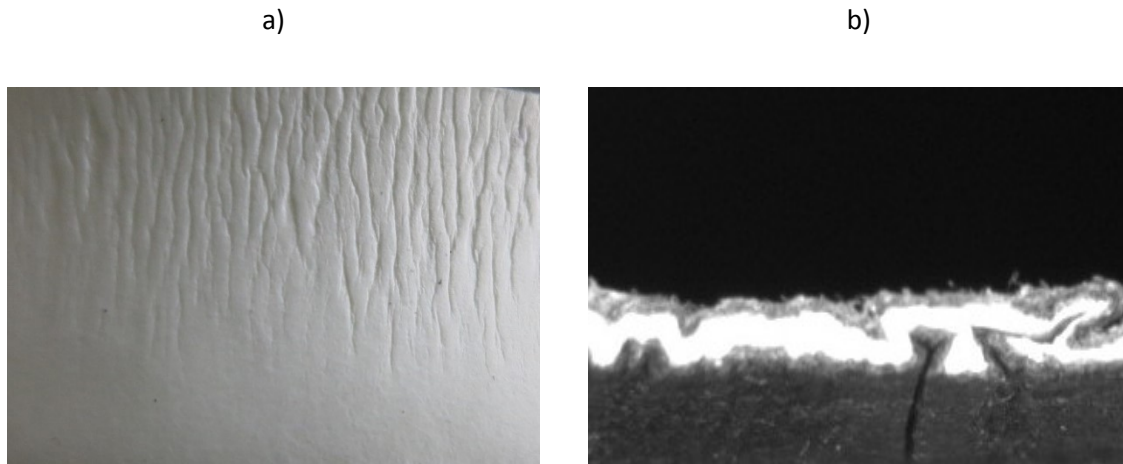


Abbildung 2.4: Vergleich der Richtung der Bildgewinnung, a) Zarge, b) Schnittkante

Abbildung 2.4 a) zeigt exemplarisch ein Bild, auf dem die Zarge eines Ziehteils zu sehen ist. Durch eine seitliche Beleuchtung der Zarge heben sich die Falten durch Schattenwurf vom Hintergrund ab. Bisherige Methoden verfolgen das Ziel, die Falten im Grauwertbild durch verschiedene Gradientenverfahren³ sowie globale oder adaptive Schwellwertverfahren und anschließende morphologische Operationen deutlicher vom Hintergrund zu segmentieren. Durch die Auswertung des Verlaufs der Grauwerte einer Bildzeile des bearbeiteten Ergebnisbildes wird die Position der Falten und darauf aufbauend deren Abstände und Verteilung ermittelt [21, 22].

Bei der Methode, die Bilder der Zargenschnittkante (**Abbildung 2.4 b)**) verwendet, wird zunächst eine Segmentierung der hellen Schnittkante vom dunklen Hintergrund vorgenommen. Bei geeigneter Beleuchtung kann dies durch Schwellwertoperationen erreicht werden. Die Lage und Anzahl der Falten äußert sich hierbei durch einen veränderlichen Abstand des Schnittkantenprofils zum Bildrand [23]. Bei diesem Verfahren können zusätzlich Schwankungen der Zargendicke ausgewertet werden. Zudem ist die Art der Falten (vgl. [5, S. 87]) in dieser Ansicht erkennbar und kann theoretisch durch Bildverarbeitung ausgewertet werden. Des Weiteren können Rückschlüsse auf die Verpressung der Falten getroffen werden.

³Ein Beispiel für Gradientenverfahren ist das Verfahren nach Sobel. Die Anwendung des Sobel-Operators bestimmt die Änderungen des Grauwertverlaufs (dessen Ableitung) in x- bzw. y-Richtung. Ein weiteres Verfahren verwendet den Laplace-Operator, welcher eine Kombination des Sobel-Operators in x- und y Richtung darstellt.

Die Aufnahme von Bildern mittels Digitalkamera dauert nur Sekundenbruchteile und auch die Rechenzeit bei der Auswertung der technischen Umsetzung wird mit 2 s als sehr gering angegeben. Die gesamte Auswertung einer Zarge wird mit 5 min 17 s beziffert (vgl. [21, S. 50f]).

2.3 Datenfilterung und Methoden der Datenauswertung

2.3.1 Charakterisierung von Messmethoden und deren Ergebnissen

Die in **Abschnitt 2.2** vorgestellten Methoden liefern Messsignale, aus denen die Lage charakteristischer Abschnitte, insbesondere Extremwerte, ausgewertet wird. Diese Signale können wie in **Tabelle 2.1** (vgl. [24, S. 27]) dargestellt, eingeteilt werden.

Tabelle 2.1: Signalarten

analog	das Signal kann in einem vorgegebenen Bereich jeden beliebigen Wert annehmen
diskret	das Signal kann nur bestimmte Werte, welche digital kodiert sein können, innerhalb eines Bereichs annehmen
kontinuierlich	das Signal ist zu jedem beliebigen Zeitpunkt ⁴ veränderlich
diskontinuierlich	das Signal ist nur zu bestimmten Zeitpunkten veränderlich

Typischerweise werden die Messwerte bei der Messung elektrischer Größen und der Weiterverarbeitung der Messungen im PC durch einen ADC (Analog – Digital – Wandler) in diskrete Werte umgewandelt, die digital kodiert vorliegen. Diese werden zu bestimmten Zeitpunkten gemessen, welche durch die Messfrequenz bestimmt werden. Da sich alle aufgeführten Messverfahren auf die Messung elektrischer Größen zurückführen lassen, liefern alle vorgestellten Verfahren diskrete diskontinuierliche Messsignale. Bei der Bildgewinnung werden zwar alle Messungen gleichzeitig aufgenommen, liegen durch die Abbildung auf Pixeln jedoch Ortsdiskret vor.

Bei der Auswertung der Signale werden Tests ausgeführt, bei denen beispielsweise überprüft wird, ob ein Extremwert des Signals signifikant von dessen Mittelwert abweicht, sodass auf die Realisierung einer Falte geschlossen werden kann. Diese Tests können positiv (Falte erkannt) oder negativ (keine Falte erkannt) ausfallen. Abhängig davon, ob tatsächlich eine Falte an der

⁴ Insbesondere in der Bildverarbeitung bezieht sich die Kontinuität auf den Ort, da im Falle von Fotografien ortsabhängige und keine zeitabhängigen Signale gewonnen werden.

entsprechenden Stelle aufgetreten ist, können die Testergebnisse wie in der Kontingenztafel (vgl. **Tabelle 2.2**) klassifiziert werden.

Tabelle 2.2: Klassifikation von Testergebnissen

	Falte	keine Falte
Test positiv	richtig positiv r_p	falsch positiv f_p
Test negativ	falsch negativ f_n	richtig negativ r_n

Die Sensitivität eines solchen Tests kann durch die bedingte Wahrscheinlichkeit in **Gleichung (2)** formuliert werden.

$$P(\text{positiv erkannt} | \text{tatsächlich positiv}) = \frac{r_p}{r_p + f_n} \quad (2)$$

Die Sensitivität kann als Trefferquote des Tests verstanden werden und wird in dem Fall, dass alle Testergebnisse richtig positiv oder richtig negativ klassifiziert werden können, gleich eins. Reziprok dazu kann durch die Falsch-Negativ-Rate der Anteil falsch negativ klassifizierter Ergebnisse beziffert werden.

2.3.2 Methoden zur Datenfilterung

Alle in **Abschnitt 2.2** vorgestellten technischen Realisierungen von Messmethoden für die Erfassung der Faltenverteilung an Ziehteilen liefern Messsignale, die von einem niederfrequenten Anteil unterschiedlicher Quelle überlagert sind. Dieser führt häufig zu Problemen in der Auswertung, da die Signalspitzen, die die Position der Falten markieren, nicht auf einem einheitlichen Messniveau liegen⁵.

Ein Ansatz zur Eliminierung dieses Signalanteils ist die Zerlegung des Signals in eine unendliche Summe von Sinus-Termen, der sogenannten Fourier-Transformation, durch welche das Signal beliebig genau angenähert werden kann. Praktisch wird jedoch häufig nur eine begrenzte Anzahl diskreter Frequenzen betrachtet (DFT). Jeder Summand hat dabei eine bestimmte Frequenz und Amplitude. Von niederfrequenten Störanteilen kann gesprochen werden, da die genannten Störgrößen die Amplituden der Summanden geringer Frequenz vergrößern. Durch eine Überführung des Signals in den Frequenzraum und anschließender Verkleinerung störender

⁵ Die häufigsten Probleme liegen hierbei in der Segmentierung durch Schwellwertverfahren und der Detektion signifikant abweichender Extremwerte.

Frequenzen, kann eine Filterung des Signals erfolgen. **Abbildung 2.5** zeigt dieses als Fouriersynthese bekannte Verfahren an einem Beispiel. [25, S. 89ff]

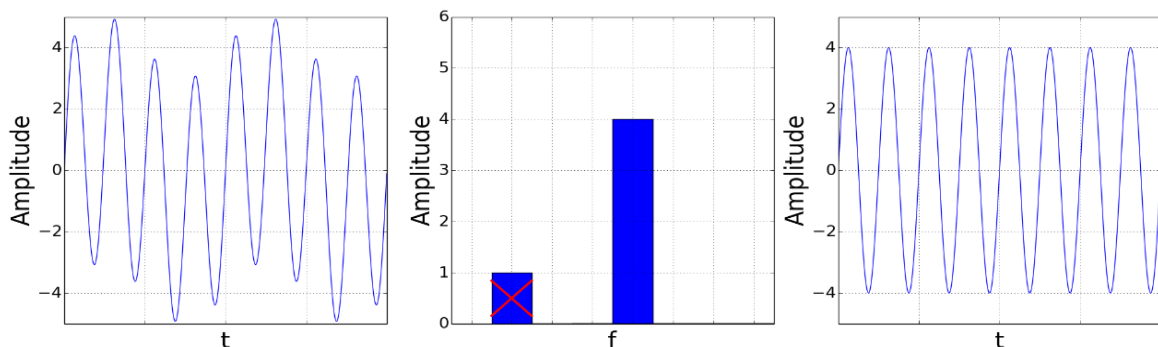


Abbildung 2.5: Prinzip der Fouriersynthese, Links: Ausgangssignal, Mitte: Eliminierung der Störfrequenz im Frequenzraum, Rechts: rücktransformiertes Signal

Links ist das gewonnene Messsignal dargestellt, welches eine Überlagerung durch einen niederfrequenten Störanteil beinhaltet. Im mittleren Bild wurde das Signal in den Frequenzbereich transformiert, wobei die Amplitude des Störanteils gleich null gesetzt wird. Nach der Rücktransformation in den Zeitbereich (rechts) ist das Nutzsignal bereinigt. Gegebenenfalls wird das Frequenzspektrum auch mit einer entsprechenden Filterfunktion multipliziert. So können Tiefpass-, Bandpass- oder Hochpassfilter erzeugt werden.

2.3.3 Fehlerquellen bei der Datenaufbereitung

Rauschen

Die Signale, die durch Sensoren gewonnen werden, beinhalten eine Information, die durch ein entsprechendes System ausgewertet werden muss. Durch verschiedene äußere Einflüsse, aber auch Eigenrauschen der Sensoren, sind die Signale unweigerlich durch einen stochastischen, regellosen Anteil überlagert, der als Rauschen bezeichnet wird. Das Rauschen zeichnet sich durch ein breites Frequenzspektrum aus und weist gegenüber dem Messsignal deutlich geringere Amplituden im Frequenzraum auf [14, S. 19].

Da Sensoren im Allgemeinen sehr kleine Messsignale liefern, ist häufig eine Verstärkung des Signals notwendig. Auf diesem Weg können bereits geringste Einflüsse auf den Sensor, wie thermische oder atmosphärische Störungen, zu einem ausgeprägten Rauschen führen. Eine qualitative Aussage über das Signal kann durch die Bildung des Quotienten aus der Leistung des Nutzsignals und der

Leistung des Rauschens getroffen werden. Dieses Verhältnis wird auch als Signal-Rausch-Verhältnis bezeichnet.

Unterabtastung

Bei der diskontinuierlichen Messung von Signalen werden zu bestimmten Zeitpunkten, die durch die Abtastfrequenz bestimmt werden, Messwerte ermittelt. Das Abtasttheorem nach Shannon fordert dabei, dass die Abtastfrequenz f_A mindestens doppelt so hoch wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz sein muss. Die mit dem Faktor zwei multiplizierte Maximalfrequenz ist gleich der Nyquist-Frequenz. Somit gilt

$$f_A > f_N = 2 \cdot f_{max} \quad (3)$$

wobei für messtechnische Anwendung häufig

$$f_A \approx (5 \dots 10) \cdot f_{max} \quad (4)$$

gewählt wird [24, S. 191ff].

Unter Verwendung einer Abtastfrequenz, die geringer als die doppelte Maximalfrequenz ist, kann das Signal nicht mehr eindeutig aus den Messpunkten rekonstruiert werden. Hierbei wird von Unterabtastung gesprochen. Bei einem unterabgetasteten Signal kann der sogenannte Alias-Effekt auftreten, bei dem Signalanteile, die eine Frequenz oberhalb der Nyquist-Frequenz aufweisen, als deutlich geringfrequenter interpretiert werden.

Fenstereffekt

Die Fourier-Transformation dient der Überführung unendlich periodischer Signale aus dem Zeit- oder Ortsbereich in den Frequenzbereich. Bei praktischen Anwendungen werden jedoch häufig nur Ausschnitte eines Signals transformiert. Durch die fehlende periodische Fortsetzung des Signals treten im Frequenzbereich weitere Frequenzen auf, die tatsächlich nicht im Nutzsignal vorhanden sind und bei einer unendlich periodischen Fortsetzung nicht auftreten würden [25, S. 110f].

Die in **Abbildung 2.6** dargestellten Diagramme veranschaulichen diese als Fenstereffekt bezeichnete Auswirkung deutlich. In der linken Hälfte ist ein Ausschnitt eines unendlichen Sinus-Signals und dessen Fourier-Transformation zu sehen. Rechts ist ein nicht periodischer Ausschnitt desselben Signals dargestellt. Das Frequenzspektrum unterscheidet sich deutlich.

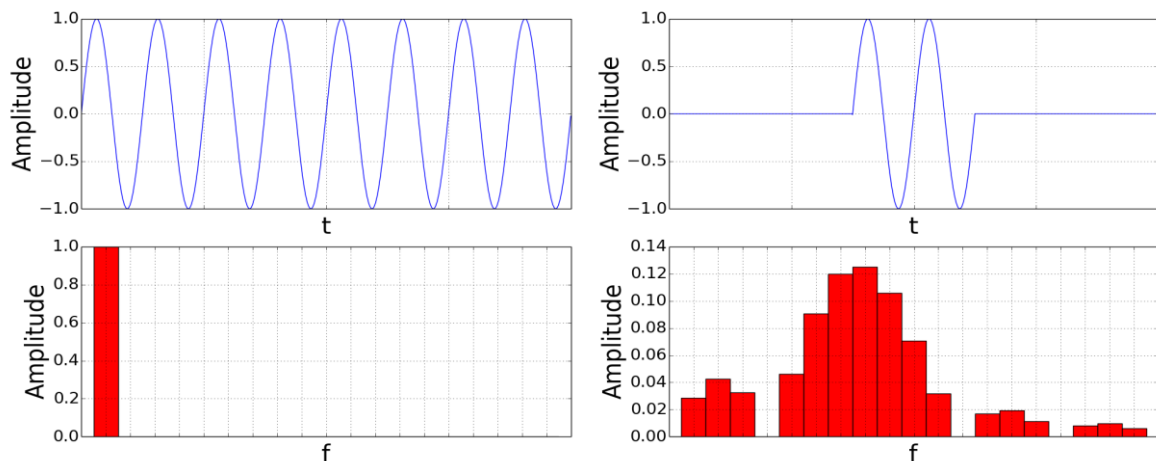


Abbildung 2.6: Fenstereffekt bei der Fourier-Transformation

Durch lange Messzeiträume, die periodische Fortsetzung des Signals oder geeignete Fensterfilterfunktionen lässt sich der Fenstereffekt minimieren. Entstehen Sprünge an den Übergängen bei einer periodischen Fortsetzung, ist weiterhin mit dem Auftreten ungewollter Frequenzen zu rechnen.

Bildfehler durch Verzeichnung

Insbesondere bei der digitalen Bildverarbeitung treten weitere Effekte auf, die Fehler in ein photogrammetrisches Messsystem einbringen können. Durch die Verwendung von Linsen in den Kameras kann die Abbildung eines Objektes auf die Sensoren verzerrt werden. Diese Verzerrung wird auch als Verzeichnung bezeichnet. **Abbildung 2.7** zeigt zwei typische Arten der Verzeichnung am Beispiel der Abbildung eines Rechtecks. Die linke Art der Verzeichnung wird als kissenförmig bezeichnet, rechts als tonnenförmig.

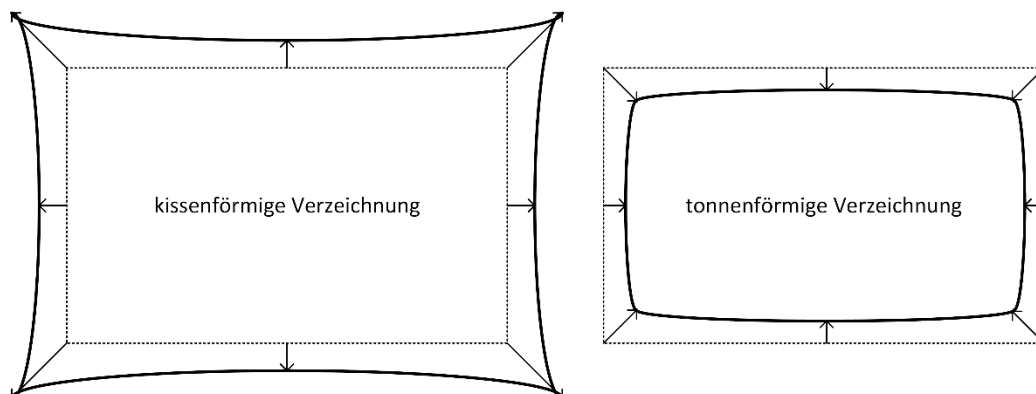


Abbildung 2.7: Typen radialer Verzeichnung nach [20, S. 97]

Die Verzeichnung tritt vor allem in radialer Richtung auf und ihr Betrag wird mit steigendem Abstand zum Kamerahauptpunkt⁶ größer. Kennzeichnend für die radiale Verzeichnung ist ihr Wachstum mit der dritten Potenz. Die Verzeichnung lässt sich durch **Gleichung (5)** gut approximieren [20, S. 97]

$$x' = \frac{x}{1 + k_3 x^2} \quad (5)$$

Mit dem Bildmittelpunkt konzentrische Kreise werden somit als Kreise abgebildet, deren Radius jedoch verzerrt ist. Durch die Anwendung der **Gleichung (5)** kann der Bildfehler minimiert werden.

Behandlung von Ausreißern

Grobe Messfehler oder händische Aufzeichnung können ein Messsignal dahingehend verfälschen, dass beispielsweise außergewöhnlich hohe Messwerte auftreten, die scheinbar nicht zu den übrigen Messungen passen. Wichtig ist dabei zu beachten, dass Ausreißer tatsächliche fehlerhafte Messungen und keine „Exoten“ sind [26]. Die Streuung, die bei einer Messung auftritt, kann vereinzelt durchaus auch ungewöhnliche hohe bzw. niedrige Werte hervorbringen.

Eine Möglichkeit zur Erkennung von Ausreißern ist die 2σ -Methode, bei der alle Werte, die außerhalb des Intervalls⁷ $\mu \pm 2 \cdot \sigma$ liegen, als Ausreißer klassifiziert und gestrichen werden. Die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Klassifizierung der Messwerte liegt demnach bei rund 5 %. Eine sorgfältige Überprüfung der Messung und eine Kontrolle, inwiefern grobe Fehler bei der Messung ausgeschlossen werden können oder ob sich nicht beachtete Faktoren auswirken, sind vor der Anwendung der 2σ -Methode dringend zu empfehlen [27, S. 23f].

2.3.4 Zählverfahren für regellose Schwingungen

Die Erkennung der Position von Falten erfolgt bei den vorgestellten Messmethoden durch die Auswertung eines Signals. Dieses weist charakteristische lokale Extremwerte auf, die auf die Position einer Falte hinweisen. Durch eine numerische Ableitung lassen sich die Positionen dieser Extremwerte bestimmen. Die Messsignale enthalten jedoch auch überlagerte Störsignale, die beispielsweise aus Rauschen resultieren, welche sich allerdings bei keiner Messung vollständig

⁶Der Kamerahauptpunkt ist in den meisten Fällen identisch mit dem Bildmittelpunkt.

⁷Dabei entspricht μ dem Mittelwert der Grundgesamtheit und σ der Standardabweichung der Grundgesamtheit. Sind diese unbekannt, werden üblicherweise der arithmetische Mittelwert und die Schätzung der Stichprobenstandardabweichung verwendet.

vermeiden lassen. Dieses Störsignal bringt mit unterschiedlicher Frequenz zusätzliche Extremwerte ein, die ohne weitere Analyse häufig als falsch positiv beurteilt werden, das heißt Falten an Positionen erkannt werden, an denen sich keine Falte befindet. Nicht in allen Fällen lassen sich diese Einflüsse durch Filterung und Glättung entfernen.

Eine Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit einer richtig positiven Zählung zu erhöhen, besteht in der Einführung einer oberen bzw. unter Schranke [28]. Bei diesem als Spitzenwertverfahren bekannten Vorgehen werden nur die Extremwerte oberhalb (bzw. unterhalb) der Schranke gezählt. Diese Zählmethode eignet sich insbesondere für stark geglättete Signale.

Kann das Rauschen durch Filterung und Glättung nicht ausreichend unterdrückt werden, bestehen hauptsächlich zwei Probleme bei der Anwendung des Spitzenwertverfahrens:

- mehrere Extremwerte des Signals befinden sich auf der Zeit- bzw. Ortsachse so dicht beieinander, dass die Detektion zweier benachbarter Realisierungen der eigentlichen Messgröße ausgeschlossen werden kann
- der Signalverlauf zwischen mehreren Extremwerten befindet sich auf einem Niveau, das keine Entscheidung zulässt, ob es sich bei benachbarten Extremwerten um eine zusammengehörige oder mehrere separate Realisierungen handelt

Abbildung 2.8 zeigt einen Signalverlauf, wie er bei der Vermessung von Falten durch eine beliebige Messmethode aus **Abschnitt 2.2** detektiert werden kann.

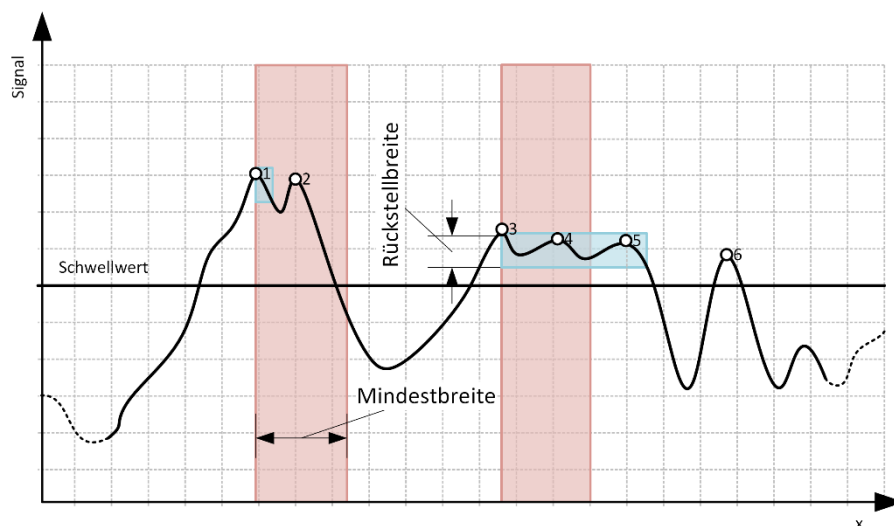


Abbildung 2.8: Klassiervverfahren zur Zählung signifikanter Signalspitzen

Nach dem Spitzenwertverfahren werden die Punkte 2, 4 und 5 falsch positiv klassifiziert. Die Punkte 1 und 2 stellen die erstere Problematik dar. Durch Störeinflüsse entstehen zwei lokale Maxima, die

sehr dicht beieinander liegen, aber mit hoher Wahrscheinlichkeit zur selben Realisierung gehören. Durch die Einführung einer Mindestbreite kann diesem Umstand Abhilfe geleistet werden. Diese ist in **Abbildung 2.8** rot dargestellt. Wird ein Extremwert erkannt und gezählt, wird eine Zählung erst beim nächsten Extremwert ausgelöst, der nicht mehr innerhalb des markierten Bereichs liegt.

Unter Umständen reicht eine Minimalbreite nicht aus, um die Extremwerte sicher klassifizieren zu können, wie die Punkte 3, 4 und 5 zeigen. Unter Verwendung der Mindestbreite wird der Punkt 5 falsch positiv klassifiziert. So entsteht der Eindruck zweier nah beieinanderliegender Realisierungen, obwohl tatsächlich nur eine vorhanden ist. In [29, S. 11f] wird mit der Rückstellbreite ein Ansatz vorgeschlagen, der diese Problematik berücksichtigt. Bevor eine neue Zählung ausgelöst wird, muss das Signal unterhalb eines Bereichs sinken, der durch die Rückstellbreite definiert wird (blau dargestellt). Somit kann erreicht werden, dass erst bei Punkt 6 die nächste Zählung ausgelöst wird.

3 Präzisierte Aufgabenstellung

Die Qualitätsbewertung von Ziehteilproben zur Validierung von Prozessmodellen für das Tiefziehen von Karton ist durch die bisher vorhandenen Bewertungswerkzeuge mit erheblichem Zeitaufwand verbunden. Die Entwicklung eines Inline-Faltenauswertungsmoduls für die schnelle und zuverlässige Ziehteilanalyse ist die Voraussetzung für eine differenzierte Untersuchung des komplexen Prozessverhaltens hinsichtlich der Faltenverteilung an Formteilen beim Tiefziehen von Karton.

Gestützt auf eine umfangreiche Recherche zum Ziehprozess, bisher entwickelten Lösungen für die Ziehteilbewertung und der digitalen Datenverarbeitung, ist ein Auswertungsmodul zu entwickeln, das in der Lage ist während des Ziehprozesses teilautomatisierte Bewertungen der Faltenverteilung an Kartonformteilen vorzunehmen. Es ist zu eruieren, welche Verfahren sich für die Inline-Messung eignen und daraufhin eine entsprechende Vorzugsvariante zu konstruieren und im Versuchsstand zu montieren.

Ferner ist unter den Gesichtspunkten Rechenzeit und Zuverlässigkeit ein Algorithmus zur Datenauswertung und –speicherung zu entwickeln. Das sich ergebende Gesamtsystem ist in Betrieb zu nehmen und bezüglich des Zusammenspiels der Komponenten und des Versuchsstandes zu untersuchen.

Der Nachweis der Funktion des Inline-Faltenauswertungsmoduls ist durch den Vergleich mit Daten auszuwählender Referenzmessmethoden zu erbringen. Hierfür werden Versuche bestimmter Parameterniveaus für runde Ziehteile durchgeführt und deren Faltenverteilung durch das Auswertungsmodul bestimmt, sodass die Übereinstimmung mit Ergebnissen der Referenzmessmethode untersucht werden kann.

Durch eine ausführliche Fehlerdiskussion sind Quellen möglicher Abweichungen zwischen dem Inline-Faltenauswertungsmodul und den Referenzmessmethoden aufzuzeigen. Durch Untersuchungen an Ziehteilen abweichender Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit sind mögliche Beschränkungen des Moduls darzulegen.

Abschließend sind auf den durch die Validierung gewonnenen Erkenntnissen basierend Vorschläge zu einer technischen Verbesserung des Inline-Faltenauswertungsmoduls zu entwickeln. Dabei ist insbesondere eine Verbesserung der Zuverlässigkeit der Datenauswertung in Betracht zu ziehen.

4 Zielsetzung und Lösungsweg

Durch das in dieser Arbeit entstehende Inline-Faltenauswertungsmodul für die objektive Bewertung der Faltenverteilung an dreidimensional umgeformten Kartonformteilen soll ein effektives Werkzeug entstehen, das in der Lage ist die bisher eingesetzten, zeitaufwändigen Bewertungsstrategien abzulösen. Durch die Möglichkeit kontinuierlich Qualitätsmerkmale im Tiefziehprozess von Karton zu messen, eröffnen sich neue Wege für eine flexible Prozessregelung. Somit stellt das Inline-Faltenauswertungsmodul ein Sprungbrett für neuartige Entwicklungen für das Tiefziehen von Karton im Rahmen von Industrie 4.0 dar.

Basierend auf einer umfangreichen Recherche zum dreidimensionalen Umformen von Karton, Methoden der Beurteilung der Faltenverteilung an Kartonformteilen sowie der Verarbeitung und Auswertung digitaler Daten werden zunächst Anforderungen an das Inline-Faltenauswertungsmodul spezifiziert und ein Funktionsmodell erstellt. Durch eine Analyse verschiedener Bewertungsmethoden, auch im Hinblick auf deren generelle Eignung, werden verschiedene Lösungsvarianten erarbeitet und diskutiert. Durch einen anschließenden Vergleich wird eine Vorzugsvariante ausgewählt.

Eine Gliederung der Vorzugsvariante erlaubt die Auswahl und Gestaltung einzelner Komponenten. Nach der Zusammenführung der Komponenten werden die Sensoren zur Erfassung der Faltenverteilung durch geeignete Methoden ausgerichtet und kalibriert.

Softwareseitig wird ebenfalls eine Modulgliederung eingeführt. Durch eine Schwachstellenanalyse vorhandener Bewertungsalgorithmen werden Ansatzpunkte für eine Anpassung und Verbesserung der Datenauswertung aufgezeigt und ein Lösungsvorschlag umgesetzt, dessen Eignung nachgewiesen wird. Die Softwarekomponenten werden in der Programmiersprache Python implementiert und hinsichtlich ihres Zusammenspiels getestet. Anschließend wird das Gesamtsystem als cyber-physisches System beleuchtet.

Aufbauend auf die Auswahl von Referenzmessmethoden wird durch die Durchführung von Versuchen mit Hilfe geeigneter statistischer Tests die Vergleichbarkeit der Inline-Messung mit den Referenzmessungen nachgewiesen und Abweichungen diskutiert. Untersuchungen an farbigen, unrunten oder aus Ziehpappe hergestellten Ziehteilen zeigen die Grenzen des Verfahrens auf.

Abschließend werden Vorschläge getroffen, um die gegebenen Restriktionen zu lockern und weitere Entwicklungsansätze herauszuarbeiten. Diese betreffen insbesondere die Verbesserung der Falterkennung und Ansätze zur weiteren Automatisierung des Auswertungsmoduls.

5 Auswahl einer geeigneten Vorzugsvariante

5.1 Analyse des Messsystems

5.1.1 Anforderungen an das Auswertungsmodul

Aus der Aufgabenstellung, den Umgebungsbedingungen sowie technischen und ökonomischen Gesichtspunkten ergibt sich eine Anforderungsliste für das Auswertungsmodul. Im Folgenden wird kurz auf wichtige Punkte der Anforderungsliste eingegangen. Die vollständige Anforderungsliste befindet sich in **Anhang B**. Bei dieser werden die Anforderungen in feste Forderungen (F), welche erfüllt werden müssen, und optionale Wünsche (W) unterschieden, um eine Priorisierung der Anforderungen vorzunehmen.

Durch das Inline-Auswertungsmodul wird eine Messung an einem Ziehteil vorgenommen, welches als annähernd zylindrisches Stückgut (Anforderung 1.1) betrachtet werden kann. Für den Ziehteilradius wird $r_{\text{ZT}} = 55 \text{ mm}$ festgelegt. Das Ziehteil kann als trocken angesehen werden, jedoch können bei der Kartonverarbeitung Fasern entstehen, die die Messung unter Umständen beeinflussen können. Die Umgebung in und um den Versuchstand ist ebenfalls trocken und weist möglichst ein konstantes Klima auf (Anforderung 5.1 – 5.4).

Für die Integration des Auswertungsmodul in die Versuchsanwendung ist es zunächst ausreichend nach MD/CD ausgerichtete Ziehteile zu untersuchen [11]. Die Ausrichtung wird dabei bereits beim Einlegen eines Zuschnitts hergestellt. Dies erfordert unter Umständen die Erhaltung der Ausrichtung bis zur Messung. Hierbei ist mindestens eine manuelle Auslösung der Messung vorzusehen, eine automatisierte Lösung ist wünschenswert (Anforderung 6.1 – 6.5).

Von dem Auswertungsmodul darf keine Gefährdung für den Anwender ausgehen. An dieser Stelle ist besonders die Berührung stromführender Leitungen auszuschließen. Da kein Schutz gegen Wasser erforderlich ist, wird die Schutzklasse IP 40 als Minimum vorausgesetzt. Bei dem Einsatz empfindlicher Messtechnik, ist deren Schutz vor thermischen und mechanischen Beschädigungen ebenfalls zu gewährleisten. (Anforderung 7.1 – 7.2) Die Montage erfolgt dabei in einen bestehenden Versuchsstand zum Ziehen von Karton.

Ein Kostenrahmen für das Gesamtsystem wurde in [11] auf maximal 1000 € festgesetzt. Diesen Kostenrahmen darf die Summe der Entwicklungs-, Fertigungs-, Einkaufs- und Validierungskosten nicht überschreiten. Der Termin, an dem das validierte Inline-Auswertungsmodul vorzuliegen hat, entspricht dem Abgabedatum dieser Arbeit (15.10.2015).

5.1.2 Funktionsmodellierung des Messablaufs

Die prinzipielle Abfolge der Teilfunktionen des Ziehens ändert sich durch die Integration des Moduls zur Inline-Messung des Faltenbildes nicht. Für den Funktionsbereich Stoff wird lediglich ein zusätzlicher Schritt zur Herstellung einer Ordnung, in diesem Kontext der Ausrichtung des Kartonzuschnitts nach MD/CD, erforderlich. **Abbildung 5.1** veranschaulicht die Integration der Ausrichtung durch den Anwender. Eine besondere Bedeutung wird nun jedoch auch der Teilfunktion Speichern beigemessen, da diese das Ziehteil der Messung zugänglich macht. Der Funktionsbereich Signal in **Abbildung 5.1** zeigt die Änderungen des Systems bezogen auf die Inline-Messung und vernachlässigt die steuerungseitigen Teilfunktionen. Dem Signalbereich werden Teilfunktionen zur Datenerfassung, Datenaufbereitung und –auswertung sowie der Speicherung hinzugefügt. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Kopplung der Datenerfassung an die Speicherung im Stoffbereich, auf welche sich die Inlinefähigkeit des Messsystems beruft.

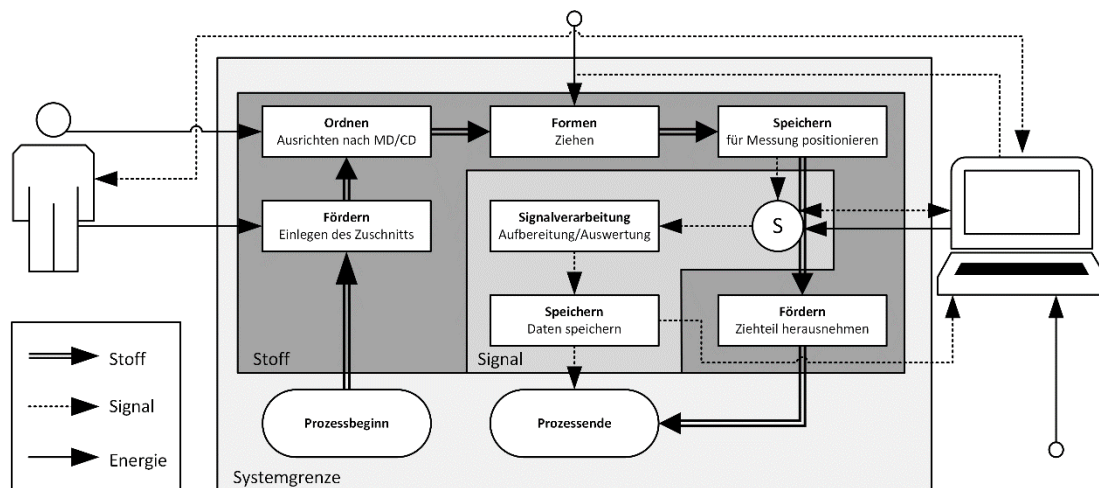


Abbildung 5.1: Funktionsmodell des Inline-Faltenauswertungsmoduls

Der Anwender ist zunächst stark in den Prozess eingebunden, insbesondere durch die manuelle Auslösung der Messung. Hierfür erhält dieser von der Teilfunktion Speichern im Stoffbereich eine optische Rückmeldung, die anzeigt, dass das Ziehteil für die Messung geeignet positioniert ist, worauf die Messung ausgelöst werden kann. Diese Rückmeldung muss über die Systemgrenze hinaus zum Anwender gelangen. Der optische Signalaustausch über die Systemgrenze hinweg wird jedoch durch das Hüllsystem des Versuchsstandes erschwert. Dessen ungeachtet steht der Anwender mit einem Rechnersystem im wechselseitigen Signalaustausch, welches wiederum einen bidirektionalen Signaltransfer mit dem Sensor betreibt. Demnach kann das optische Positionssignal über diesen Weg umgeleitet werden und so den Anwender erreichen. Dieses Vorgehen kann auf

alle weiteren Signale angewendet werden, die die Systemgrenze verlassen. Abgesehen von den Steuersignalen, betrifft dies in erster Linie die Rückmeldung über den Erfolg der Datenspeicherung. Darüber hinaus überträgt der Anwender Energie und Stoff durch die Systemgrenzen, in Form des Einlegens sowie Ausrichtens des Zuschnitts, in das System. Eine Automatisierung dieser Teilvorgänge ist nicht Teil dieser Arbeit. Des Weiteren wird Energie, die für den Ziehprozess notwendig ist, von außen in das System eingebracht. Auch die Energieversorgung des Sensorsystems erfolgt über die Systemgrenze hinweg.

5.2 Kriterien für Messmethoden zur Inline-Messung am Anwendungsfall

Für die Eignung einer bestimmten Messmethode für eine Inline-Erfassung von Messsignalen sind verschiedene Kriterien von Bedeutung. Insbesondere die Dauer der Messung der Falten und deren Verteilung an einem Ziehteil müssen ausreichend kurz sein, damit der Prozess nicht unnötig aufgehalten und die Taktzeit vergrößert wird. Die Analysedauer ist in diesem Kontext zweitrangig, jedoch sollte auch diese nicht dazu führen, dass Verzögerungen im Prozess entstehen. Im Hinblick auf eine automatisierte Klassifizierung der Ziehteile in Gutteile und Ausschuss darf die Summe der Erfassung- und Analysezeit nicht die Zeit überschreiten, die für die Herstellung eines Ziehteils benötigt wird. Im Rahmen der Versuchsanwendung werden dafür 30 s als ausreichend eingestuft, im Hinblick auf eine Umsetzung im industriellen Maßstab wird jedoch eine Mess- und Analysezeit von ca. 1 s angestrebt.

Die in **Abschnitt 2.1.1** beschriebene Beheizung des Stempels sowie der Ziehbuchse kann zu erhöhten Temperaturen im Versuchsstand führen. Erfahrungsgemäß kann eine Umgebungstemperatur oberhalb von ca. 40 °C ausgeschlossen werden⁸. Da Sensoren zum Teil empfindlich gegenüber erhöhten Temperaturen reagieren, muss bei der Auswahl eines Messsystems darauf geachtet werden, dass die Sensoren für einen Dauerbetrieb bei diesen thermischen Bedingungen ausgelegt sind. Des Weiteren entstehen bei der Verarbeitung von Karton Fasern, die sich auf den Oberflächen des Sensors absetzen können. Demnach ist ein Sensorsystem zu wählen, das robust gegenüber Verschmutzungen auf den Optiken und überdies zugänglich für eine Reinigung ist.

Die Auflösung des Messsystems ist ebenfalls von großer Bedeutung. Bei den Falten, die zu messen sind, handelt es sich um Strukturen von einigen µm Breite und Tiefe. Diese muss das Messsystem auflösen oder durch geeignete Methoden der Messung zugänglich machen können. Durch das auf

⁸ Bei ausreichendem Abstand von beheizten Oberflächen.

den Ort bezogene Abtasttheorem (vgl. **Abschnitt 2.3.3**) können erhöhte Anforderungen an periphere Baugruppen des Messsystems entstehen. Ist eine Relativbewegung zwischen Sensor und Ziehteil notwendig, muss diese in Schritten durchgeführt werden, die klein genug sind, um eine einzelne Falte aufzulösen.

Essenziell für die Inline-Messung ist die anschließende Aufbereitung und Auswertung der Messdaten, um daraus die eigentlichen Zielgrößen zu gewinnen und gegebenenfalls Reaktionen ableiten zu können. Daher muss eine Schnittstelle zur Verfügung stehen, welche es erlaubt die Messdaten in einem geeigneten Format direkt an einen PC zu übertragen. Eine Speicherung der Daten auf einem internen Speicher, beispielsweise einer SD-Karte, ist daher nicht im Sinne einer Inline-Messung.

Die Inline-Messung erfordert zudem eine zerstörungsfreie und vorzugsweise berührungslose Messung. Da alle vorgestellten Methoden diese wichtige Anforderung erfüllen, wird sie im Weiteren nicht betrachtet bzw. zur Bewertung herangezogen.

Ein weiteres Kriterium, das jedoch eine untergeordnete Rolle bezüglich der Eignung zur Inline-Messung spielt, ist der Definitionsbereich der Messung. Gemeint ist damit, ob das Messsystem Daten des gesamten Zargenumfangs zur Verfügung stellt oder lediglich einen Abschnitt davon. Aber auch die Möglichkeit unterschiedliche Zargenhöhen bzw. die gesamte Zarge darzustellen, muss bei der Auswahl eines Messverfahrens beachtet werden.

5.3 Vergleich der Sensorsysteme im Hinblick auf die Inline-Messung

In **Abschnitt 5.2** konnten wichtige Kriterien identifiziert werden, anhand derer eine Bewertung verschiedener Messsysteme bezüglich ihrer Eignung für die Inline-Messung getroffen werden kann. Diese Bewertung erlaubt einen objektiven Vergleich unterschiedlicher Methoden der Datengewinnung. **Tabelle 5.1** stellt die in **Abschnitt 2.2** vorgestellten Methoden unter Berücksichtigung dieser Kriterien gegenüber (vgl. [15, 17, 21]).

Tabelle 5.1: Vergleich verschiedener Messmethoden bezüglich ihrer Eignung für die Inline-Messung

	Lasertriangulation	konfokale Abst.-M.	Bildverarbeitung
Messdauer t_M	k. A.	~ 40 s	~ 60 ms
Analysezeit t_A	k. A.	k. A.	~ 2 s

$t_M + t_A^9$	$\sim 120\text{ s}$	$\sim 60\text{ s}$	$\sim 2\text{ s}$
Robustheit gegenüber			
Umgebungsbedingungen	empfindlich	empfindlich	gut
ausreichende Auflösung verfügbar	✓ [15]	✓ [17]	✓ [21]
Schnittstellen	vorhanden	vorhanden	vorhanden
möglicher Wertebereich	gesamter Umfang	gesamter Umfang	Abschnitt des Umfangs
linienförmige/flächige Messung	linienförmig	linienförmig	flächig

In verschiedenen Arbeiten konnte bereits nachgewiesen werden, dass alle vorgestellten Methoden eine ausreichend hohe örtliche sowie zeitliche Auflösung besitzen, um das Faltenbild von tiefgezogenen Kartonformteilen mit hoher Sensitivität zu bestimmen. Insbesondere bei der Lasertriangulation und der chromatisch konfokalen Abstandsmessung konnten technische Umsetzungen realisiert werden, bei denen der gesamte Zargenumfang auf einer Linie betrachtet werden konnte. Bildverarbeitungsmethoden liefern dagegen lediglich einen Ausschnitt der Zarge, sind dafür aber in der Lage mit einer Messung Messwerte über die gesamte Zargenhöhe zu liefern. Daher können Kameras als sehr flexibel sowohl bezüglich der Zargenhöhe als auch des Ziehteildurchmessers betrachtet werden. Durch die Erfassung eines Zargenausschnittes ist es unter Umständen nötig, mehrere Kameras bei der Bildverarbeitung zur Bildgewinnung einzusetzen. Diese können durchaus parallel die Messungen am Ziehteil vornehmen. Vor allem die Bildverarbeitungsmethoden zeichnen sich an dieser Stelle durch extrem kurze Messdauern t_M und zudem eine vergleichsweise hohe Robustheit gegenüber Verunreinigungen sowie eine gute Reinigbarkeit aus.

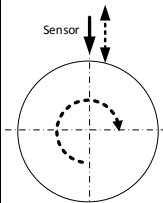
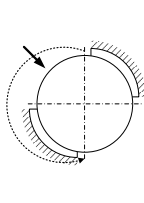
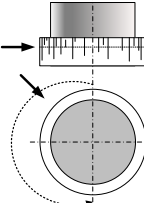
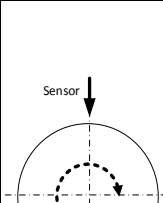
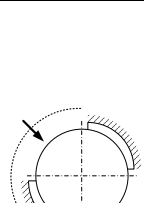
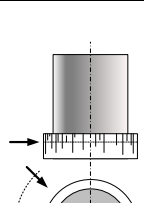
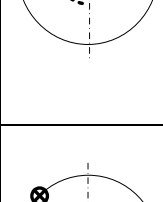

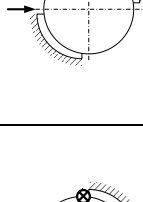
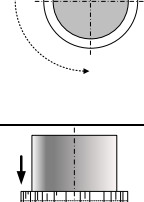
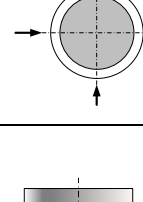
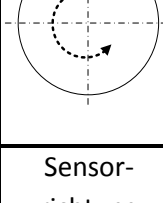
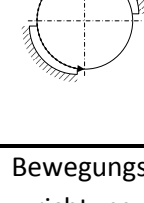
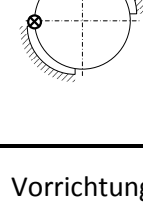
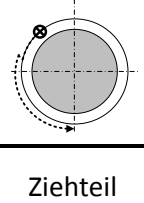
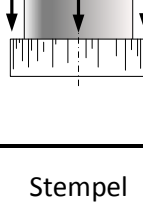
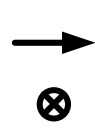
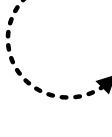

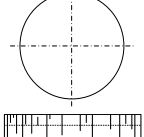
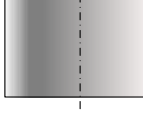
5.4 Bildung geeigneter Lösungsvarianten

Aufbauend auf den bisherigen technischen Umsetzungen [15, 17, 21] werden im Folgenden Lösungsvarianten erarbeitet und beschrieben, die sich prinzipiell zur Inline-Messung eignen. Grundsätzlich lassen sich die unterschiedlichen Lösungsvarianten unterhalb der Ziehbuchse einbauen, um einen Transport des Ziehteils nach dem Herstellungsprozess zu vermeiden. Daher

⁹ Die bisher umgesetzten Verfahren [15, 17, 21], weisen teilweise erhebliche spezifische Nebenzeiten auf, die der Probenvorbereitung, manuellen Datenaufbereitung, o.ä. dienen. Da diese bei der automatisierten Inline-Messung entfallen, werden diese an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

muss das Ziehteil nach dem Ziehprozess für den Messzeitraum gespeichert werden, um der Messung verfügbar zu sein. Des Weiteren erfordern einzelne Messmethoden eine Relativbewegung zwischen Ziehteil und Sensor, wobei die Varianten eines bewegten Ziehteils oder eines bewegten Sensors unterschieden werden können. Ferner führen die Messmethoden selbst zu neuen Varianten in der Lösungsmenge der Prinziplösungen, insbesondere dadurch, dass sich die Richtung, aus der die Messungen durchgeführt werden, unterscheiden. Durch eine Gegenüberstellung und Permutation dieser Teilvarianten ergibt sich die Lösungsmenge in **Tabelle 5.2**.

Tabelle 5.2: Morphologischer Kasten der Prinziplösungen

Zieheteilspeicherung			durch Vorrichtung			am Stempel	
Zieheteilbewegung			rotiert	unbewegt		unbewegt	
Sensorbewegung			unbewegt	rotiert	unbewegt	rotiert	unbewegt
Sensor	konf. Abst.-M.	Zarge			×		×
	Laser-Tri.				×		×
	Kamera	Schnittkante					
							
Legende			Sensor- richtung	Bewegungs- richtung	Vorrichtung	Zieheteil	Stempel
							

Da die chromatisch konfokale Abstandsmessung sowie die Lasertriangulation zwingend eine Relativbewegung zwischen Ziehteil und Sensor erfordern, entfallen Varianten dieser Messmethoden, bei denen Ziehteil und Sensor unbewegt sind. Aufbauend auf den übrigen Kombinationen der Teillösungen werden nachfolgend Ansätze für die strukturelle Umsetzung des Inline-Messmoduls beschrieben.

Konfokale Abstandsmessung (Lösungsvariante 1 - KAM)

Der grundlegende Aufbau gleicht dem in [17], wobei ein feststehender chromatisch konfokaler Sensor ein rotierendes Ziehteil vermisst. Das Ziehteil wird nach dem Ziehprozess durch eine geeignete Halterung auf einem beweglichen Drehteller fixiert, welcher die Rotationsbewegung ausführt. Der Sensor ist dabei auf einer Linearachse in radialer Richtung zum Ziehteil angebracht, um den Ausgleich der Abweichung der Idealform des Ziehteils zu gewährleisten (vgl. **Abschnitt 2.2.3**). Ein weiterer Abstandssensor geringerer Auflösung misst die Lageabweichung der Zarge, wodurch eine Regelung der Linearbewegung des konfokalen Sensors stattfinden kann. Erforderlich ist die Konstruktion eines Gestells, das die Linearbewegung des Sensors erlaubt, sowie einer geeigneten Drehvorrichtung. Des Weiteren muss bei der Übergabe des Ziehteils an den Drehteller darauf geachtet werden, dass die Orientierung des Ziehteils erhalten bleibt.

Lasertriangulation (Lösungsvariante 2 - LT)

Nach dem Ziehprozess wird das Ziehteil auf einer beweglichen Vorrichtung eingespannt, über die die Relativbewegung zwischen Ziehteil und Sensor realisiert wird. Vergleichbar ist diese Variante mit der Umsetzung in [15], wird jedoch um eine automatisierte Lösung für die Einspannung des Ziehteils ergänzt. Die Übertragung und Auswertung der Messdaten kann wie bei der bisherigen Umsetzung erfolgen. Konstruktiver Aufwand entsteht durch die bewegliche Einspannvorrichtung sowie das Gestell.

Mehrkamerasystem (Lösungsvariante 3 – MKS)

Die Messung durch das Mehrkamerasystem findet statt, bevor das Ziehteil an der Ziehbuchsenunterseite vom Stempel abgestreift wird. Mehrere Kameras fotografieren dabei die Zarge des Ziehteils, wodurch ein kurzer Stempelstillstand erforderlich wird, und verarbeiten die

Bilder mittels geeigneter Methoden. Um den Einfluss von Umgebungslicht zu minimieren, sind eine Verdunklung des Messraums und eine Beleuchtung der Zarge vorgesehen.

Insbesondere die Abstimmung zwischen Messzeitpunkt und Stempelposition ist für die erfolgreiche Messung entscheidend. Bei der Umsetzung dieser Variante ist lediglich ein Gestell als Halterung für die Kameras, die Beleuchtung und die Verdunklung zu konstruieren.

Bildverarbeitung des Zargenpanoramas (Lösungsvariante 4 – PBV)

Die Bildverarbeitung des Zargenpanoramas setzt auf ein bewegliches Kamerasystem, das mehrere Bilder der Zarge des auf dem Stempel fixierten Ziehteils aufnimmt. Diese Methode setzt voraus, dass die aufgenommenen Bilder durch sogenanntes Stitching¹⁰ zusammengefügt werden. Das so entstehende Bild kann durch Methoden, wie sie beispielsweise in [21, 22] verwendet werden, ausgewertet werden. Die Verarbeitung der Bilder wird durch einen Raspberry Pi ausgeführt, der mit der Kamera rotiert. Die Stromversorgung des Rechners und der Kamera erfolgt über einen Schleifring, die Informationsübertragung kann über eine kabellose Schnittstelle (WLAN) stattfinden. Für diese Variante sind ebenfalls eine Verdunklung und eine Beleuchtung im Inneren des Versuchsstandes vorgesehen. Ein hoher Entwicklungsaufwand entsteht vor allem bei der Zusammensetzung der Teilbilder sowie der peripheren Schnittstellen zur Energie- und Informationsübertragung.

Bildverarbeitung der Schnittkante (Lösungsvariante 5 – BVSK)

Lösungsvariante 5 beruht auf der Analyse der Schnittkante mittels Bilderverarbeitung. Eine Kamera fotografiert die Schnittkante eines schrittweise rotierenden Ziehteils und fügt die Einzelbilder, beispielsweise durch Musterfindung im Dickenprofil, zusammen. Es ist eine Drehvorrichtung, eine Halterung für die Kamera und die Beleuchtung zu konstruieren.

¹⁰ Beim Stitching wird eine Bildfolge zu einem einzigen Bild zusammengefügt (Panorama). Der Bildbereich der Einzelbilder muss sich dafür teilweise überlappen. Sich überlappende Bereiche werden dabei erkannt und die aufeinanderfolgenden Einzelbilder so übereinander geschoben, dass ein komplettes Panorama der Zarge entsteht.

5.5 Auswahl der Vorzugsvariante

Im Folgenden werden die Lösungsvarianten aus **Abschnitt 5.4** durch einen gewichteten Variantenvergleich bewertet, um eine Vorzugsvariante auszuwählen. Das Bewertungssystem sieht eine Bewertung von 1 (mangelhaft) bis 5 (ausgezeichnet) vor. Die Bewertungsunterteilung, die Begründung der Gewichtsverteilung sowie Erläuterungen zu einzelnen Teilbewertungen sind in **Anhang C** zu finden.

Tabelle 5.3: Gewichteter Variantenvergleich

	\hat{W}_i		KAM		LT		MKS		PBV		BVSK	
Kriterium	W_i	$\frac{W_i}{\sum(W_i)}$	B_i	$\hat{W}_i \cdot B_i$	B_i	$\hat{W}_i \cdot B_i$	B_i	$\hat{W}_i \cdot B_i$	B_i	$\hat{W}_i \cdot B_i$	B_i	$\hat{W}_i \cdot B_i$
Konstr. Aufwand	2	0,08	2	0,16	3	0,24	4	0,32	1	0,08	2	0,16
Softwareentw.	2	0,08	2	0,16	4	0,32	4	0,32	2	0,16	3	0,24
Platzbedarf	1	0,04	3	0,12	3	0,12	3	0,12	4	0,16	4	0,16
Kosten	3	0,12	2	0,24	2	0,24	4	0,48	3	0,36	3	0,36
Messdauer	5	0,20	3	0,60	3	0,60	5	1,00	3	0,60	3	0,60
Systemkompl.	4	0,16	3	0,48	3	0,48	4	0,64	2	0,32	4	0,64
Zuverlässigkeit	5	0,20	4	0,80	4	0,80	4	0,80	3	0,60	4	0,80
Flexibilität	3	0,12	4	0,48	4	0,48	4	0,48	4	0,48	3	0,36
$\sum(\hat{W}_i \cdot B_i)$				3,04		3,28		4,16		2,76		3,32

Wie **Tabelle 5.3** entnommen werden kann, erzielt das Mehrkamarasystem (MKS) die beste Bewertung unter allen Lösungsvarianten. Es zeichnet sich insbesondere durch die kurzen Messdauern, die hohe zu erwartende Zuverlässigkeit und Flexibilität aus. Durch die Speicherung direkt am Stempel entfällt die zusätzliche Ausrichtung (Ordnen nach MD/CD) des Ziehteils nach dem Ziehen, da diese während des Prozesses erhalten bleibt. Des Weiteren kann bei dieser Variante auf bewegliche Teile und Baugruppen verzichtet werden. Aus diesen Gründen wird das Mehrkamarasystem im Folgenden einer genaueren Analyse bezüglich der Modulgliederung sowie der Anforderungen an die Integration in das Gesamtsystem unterzogen und bis zum technischen Entwurf konstruiert.

6 Hardwareseitige Entwicklung des Auswertungsmoduls

6.1 Gliederung in Module

Im weiteren Verlauf der Entwicklung des Auswertungsmoduls wird das System in kleinere Teilmodule gegliedert, die einzeln betrachtet werden können. Hierfür kann das Auswertungsmodul in die Hardware-Komponenten Sensor, Stützsystem (Gestell), Hüllsystem (Verdunklung) und Beleuchtung unterteilt werden. Für die Auswahl und Gestaltung wird im Folgenden auf unterschiedliche Kriterien der Komponenten eingegangen und eine konkrete Auswahl getroffen.

Die Komponenten können als einzelne Baugruppen betrachtet werden, von denen insbesondere das Gestell als Verbindungsglied dient. Es ist für die Positionierung der Kameras sowie die Ausrichtung und Befestigung der Beleuchtung verantwortlich. Das Hüllsystem kann davon weitestgehend unabhängig betrachtet werden.

6.2 Auswahl und Gestaltung der Hardware-Komponenten

6.2.1 Kamerasystem

Auswahl des Kameramodells

Für die Auswahl eines Kameramodells wird zunächst die notwendige Auflösung untersucht. Abhängig von der Entfernung der Kamera zur Zargenoberfläche werden die Falten unterschiedlich breit dargestellt. In [21] wurden Versuche durchgeführt, die zeigen, dass eine Auswertung des Faltenbildes auch mit Bildern möglich ist, die mittels „einfache[r] Digitalkameras“ gewonnen wurden. Da hierbei keine konkreten Angaben zur Auflösung getroffen wurden, wird auf Basis einer Marktrecherche eine Auflösung von ca. 1600 x 900 Pixel angenommen¹¹. Im Vergleich zu Industriekameras, welche auch in deutlich höherer Auflösung verfügbar sind, können durch die Wahl von Digitalkameras enorme Kostenreduktionen erzielt werden. Der Kostenfaktor ist bei der gewählten Vorzugsvariante von besonderer Bedeutung, da mehrere Kameras benötigt werden.

Digitalkameras speichern die Bilder in der Regel auf SD-Karten o.ä. und sind überdies nur bedingt extern triggerbar. Die Kriterien für Inline-Messungen aus **Abschnitt 5.2** fordern jedoch die Übertragung der Bilddaten an ein Rechnersystem. Somit sind Digitalkameras ohne Weiteres nicht im Rahmen dieser Arbeit einsetzbar.

¹¹ Testfotografien bestätigen, dass bei dieser Auflösung die Faltenstrukturen auf den Bildern erkennbar sind.

Einen Kompromiss können dabei Webcams darstellen. Diese werden üblicherweise für die Aufzeichnung von Videos verwendet, die beispielsweise über das Internet übertragen werden. Dafür verfügen Webcams in der Regel über eine USB-Schnittstelle, über die die Kameras gesteuert und mit Energie versorgt werden. Die USB-Schnittstelle übernimmt überdies die Übertragung der aufgezeichneten Bilder. Aktuelle Modelle bieten teilweise sogenannte Full HD Auflösung. Diese entspricht einer Auflösung von 1920 x 1080 Pixeln und liegt damit über der als minimal angenommenen Auflösung von 1600 x 900 Pixeln.

Bei Tests mit verschiedenen Modellen zeigt sich, dass der Abstand zwischen Kamera und Zargenoberfläche ein wichtiges Kriterium bei der Kameraauswahl darstellt. Je näher die Kamera der Objektoberfläche kommt, desto besser sind die Falten zu erkennen. Jedoch können die getesteten Modelle¹² jeweils ab einem bestimmten Abstand die Zarge nicht mehr scharf darstellen. Durch die verwendeten Linsensysteme können die Kameras die Fokusebene nur in einem bestimmten Bereich verschieben. Demnach ist ein Modell zu wählen, dass sowohl eine hohe Auflösung besitzt, als auch fokussierte Bilder in einem möglichst geringen Abstand aufzeichnen kann.

Nach einer Recherche zu verfügbaren Modellen zeichnet sich vor allem die MICROSOFT LIFECAM STUDIO 1080P durch geringe Kosten und Fokussierbarkeit bis unter 10 cm Abstand zum Objekt aus. Des Weiteren weist dieses Modell eine sehr kompakte Bauweise auf. Das Datenblatt [30] kann in **Anhang E** eingesehen werden. Weiterhin erfüllt dieses Modell auch die Anforderung bezüglich Temperaturbeständigkeit und Reinigbarkeit.

Anordnung der Kameras

In diesem Abschnitt wird sowohl die notwendige Anzahl von Kameras als auch deren räumliche Anordnung festgelegt. In [21, S. 55] wird ein Mehrkamarasystem vorgeschlagen, welches über fünf Kameras verfügt und die gesamte Zarge auswerten kann. Im Folgenden wird untersucht, ob die Zahl der Kameras reduziert werden kann, um den Kostenaufwand zu verringern.

Die Zarge der Ziehteile wird bisher häufig in vier Bereiche unterteilt, die symmetrisch entsprechend der Richtung MD bzw. CD verteilt sind. Diese Unterteilung wird getroffen, da das Faltenbild in MD und CD deutlich voneinander abweicht. Durch das anisotrope Verhalten von Karton befinden sich in den beiden MD-Bereich mehr Falten, als in den CD-Bereichen. **Abbildung 6.1** zeigt diese

¹² Folgende Modelle wurden auf ihre Eignung untersucht (nähere Informationen dazu in **Anhang D**):

- Raspberry Pi Kamera-Modul
- Microsoft LifeCam vx-2000
- Microsoft LifeCam Studio 1080p

Unterteilung. Ferner ist hier das vorgeschlagene 5-Kamerasystem einer Variante mit nur zwei Kameras gegenübergestellt¹³.

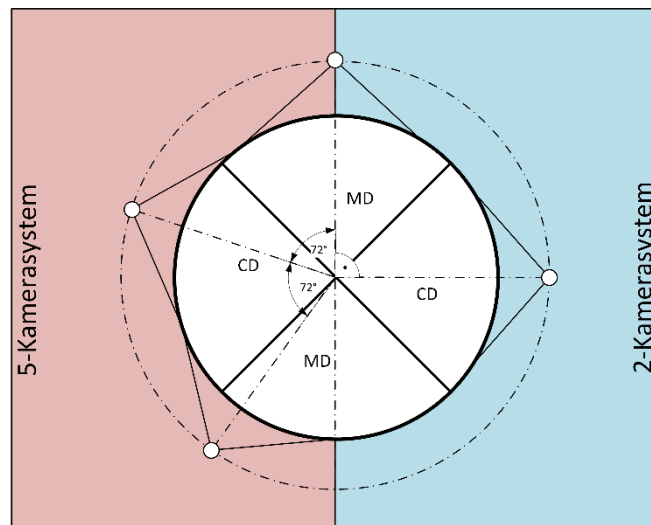


Abbildung 6.1: Varianten der räumlichen Anordnung von Kameras

Zwar zeichnet sich das 5-Kamerasystem dadurch aus, dass es theoretisch die gesamte Zarge abdecken kann, jedoch ist die Anordnung in einem Winkel von $360^\circ/5 = 72^\circ$ als ungünstig zu betrachten. Es ist davon auszugehen, dass die Messung in den Randbereichen der Bilder durch die Krümmung der Zarge ungenauer wird. Jedoch fallen zum Teil die Abschnitte der MD/CD-Bereiche, die das charakteristischste Verhalten der Kartonanisotropie (den größten Unterschied im Faltenbild) aufweisen, in die Bildrandbereiche. Im Umkehrschluss werden mitunter die Übergangsbereiche von MD nach CD mit hoher Genauigkeit gemessen. Durch die Randunschärfe wird zudem die Möglichkeit erschwert, ein Panorama aus den Teilbildern zu erstellen.

Werden nun jedoch die Kameraachsen deckungsgleich mit den Symmetrieachsen der MD/CD-Bereiche ausgerichtet, entstehen diverse Vorteile. Einerseits reduziert sich die Anzahl der Kameras mindestens um eins. Andererseits werden die charakteristischen Faltenausprägungen in den Messabschnitt gerückt, in dem eine hohe Genauigkeit verfügbar ist. Die wenig aussagekräftigen Übergangsbereiche werden jedoch nicht von der Messung erfasst. Somit kann eine präzisere Aussage über die anisotropieabhängigen Umformeigenschaften von Karton getroffen werden.

Wird eine Punktsymmetrie um den Ziehteilmittelpunkt bezüglich der Faltenausprägung vorausgesetzt, liefern zwei um 180° versetzte Kameras nicht mehr Informationen, als eine. Die Faltenausprägung ließe sich als stochastischer Prozess modellieren, bei dem zwei auf der Zarge

¹³ Dargestellt ist jeweils nur eine Hälfte der jeweiligen Variante. Das 5-Kamerasystem ist um die vertikale Achse symmetrisch, das 2-Kamerasystem verfügt auf der nicht dargestellten Seite über keine Kameras.

gegenüberliegende Punkte die gleiche Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Falte aufweisen. Somit stellt sich für diese Punkte bei ausreichender Stichprobengröße an verschiedenen Ziehteilen¹⁴ der gleiche Mittelwert ein. Daher kann die Anzahl der Kameras auf zwei reduziert werden (vgl. [31, S. 58]), die um 90° versetzt das Ziehteil vermessen.

6.2.2 Beleuchtung

Die Falten auf der Zarge eines Ziehteils heben sich vor allem durch Schattenwurf vom Hintergrund ab. In [21, S. 74f] konnte in verschiedenen Versuchen gezeigt werden, dass die Erkennbarkeit der Faltenschatten von einer seitlichen Belichtung profitiert. **Abbildung 6.2** zeigt dies an einem schematischen Beispiel.

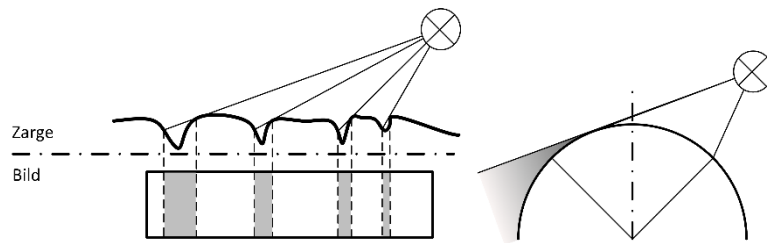


Abbildung 6.2: Schattenwurf an Falten, schematisch

Bei Vorversuchen zeigt sich, dass eine einseitige Beleuchtung nicht geeignet ist, um einen ausreichenden Schattenwurf der Falten auf dem gesamten durch eine Kamera abgedeckten Bereich zu erreichen (vgl. **Abbildung 6.2** rechts). Dies ist auf die Krümmung der Zarge bzw. auf die Zylinderform des Ziehteils zurückzuführen. In [21] wurden nur Zargenbereiche von rund 30 mm Breite untersucht, für die sich die Krümmung bezüglich der Beleuchtung nicht signifikant auswirkt. Infolgedessen werden für jeden Bildbereich zwei Beleuchtungseinheiten vorgesehen.

Für die Auswahl der Beleuchtung werden zunächst nur verschiedene LED-Typen untersucht, da mit diesen bereits sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Ferner sind LEDs sehr kostengünstig und energiesparend einsetzbar. Hierbei erweisen sich sogenannte LED Lichtstreifen als besonders geeignet. Diese in der Länge individuell anpassbaren Streifen bestehen aus in flexiblen Kunststoff vergossenen LEDs. Der Kunststoff schützt die LEDs sowie den Benutzer mit der Schutzart IP 44 und erfüllt somit die Sicherheitsanforderungen (vgl. **Abschnitt 5.1.1**). Die Stromversorgung kann über ein 12V-Netzteil erfolgen.

¹⁴ Gleichbleibende Einstellparameter vorausgesetzt

Die Positionierung der Beleuchtungselemente erfolgt links und rechts von den beiden Kameras. Durch die 90°-Anordnung dieser, besteht die Möglichkeit einer Überbelichtung der Zarge durch die zwei benachbarten Beleuchtungselemente der Kameras. Durch die Kombination verschiedener LED-Anzahlen konnte die in **Abbildung 6.3** dargestellte Konfiguration als geeignet ermittelt werden.

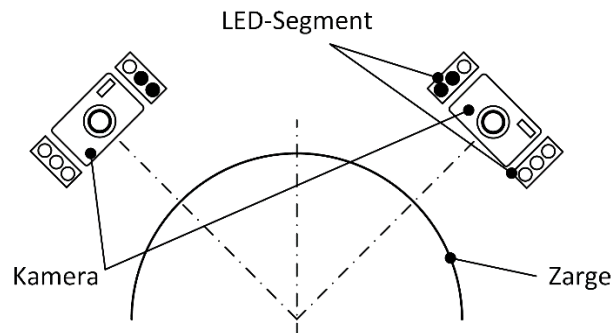


Abbildung 6.3: Geeignete Beleuchtungskonfiguration

Die ausgewählten LED Lichtstreifen, deren Datenblatt in **Anhang F** eingesehen werden kann, können in unabhängige Segmente zu je drei LEDs unterteilt werden. Die in der obigen Abbildung schwarz dargestellten LEDs wurden durch Abkleben verdunkelt, um eine Überbelichtung zu vermeiden.

6.2.3 Stützsystem

Das Stützsystem erfüllt verschiedene Aufgaben bei der Inline-Messung. Neben der Fixierung der Kameras und der Beleuchtung muss überdies auch eine Positionierung der Kameras möglich sein. Der Bildbereich der Kamera liegt günstigerweise symmetrisch zur Achse des Stempels. Zudem erweist sich die Ausrichtung der zu untersuchenden Zargenhöhe in die Bildmitte als ideal. **Abbildung 6.4** zeigt die Ausrichtungsfunktionen des Gestells. Eine Ausrichtung senkrecht zur dargestellten Bildebene muss nur im Millimeterbereich möglich sein und dient somit der Feinjustierung der Kamera.

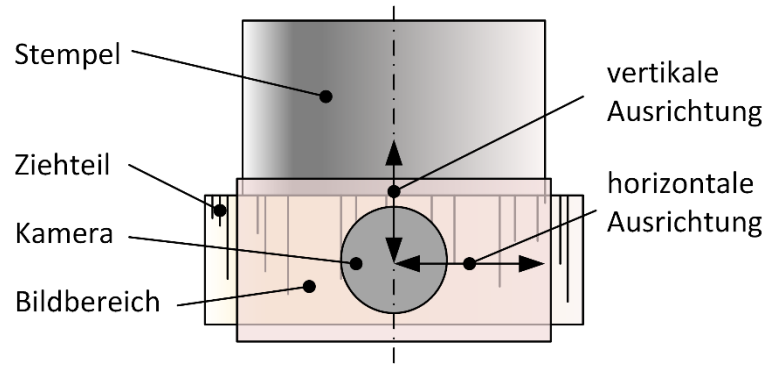


Abbildung 6.4: Gestellfunktionen

Durch die Verwendung bereits vorhandener Aluminiumprofile der Firma item Industrietechnik GmbH entstehen sowohl Kostenvorteile, als auch eine erhebliche Zeitersparnis, da nicht auf die Fertigung von Einzelteilen gewartet werden muss. Auf Basis der vorhandenen Profile wird ein offenes Rahmengestell konstruiert, montiert und in den Versuchsstand eingebaut. Für die Fixierung der Kameras werden Kunststoffelemente verwendet, die üblicherweise der Kabelführung dienen. Auf diese Weise können die Kameras schonend und sicher positioniert werden. **Abbildung 6.5** zeigt die in den Versuchsstand eingebaute Gestellvariante.

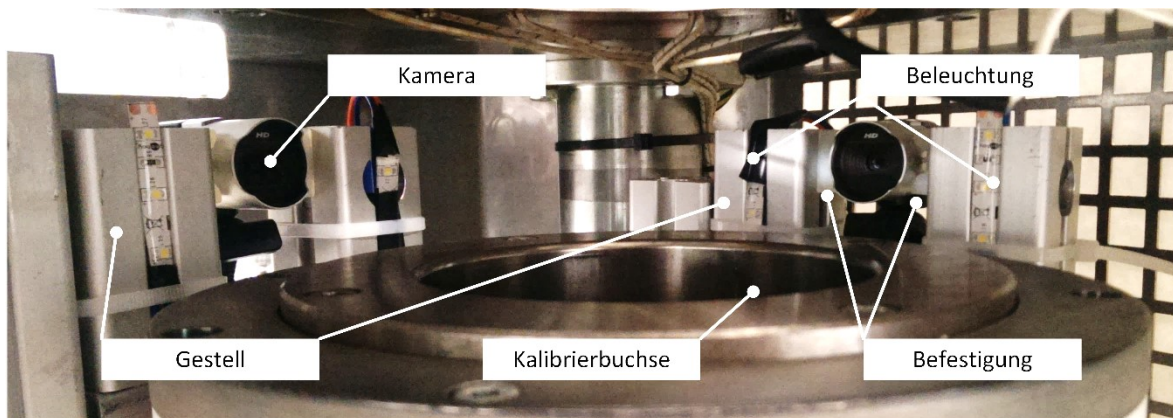


Abbildung 6.5: Eingebaute Gestellvariante

Die Konstruktion des Gestells erlaubt eine getrennte Einstellung der Kameraposition, ohne die Kameras ausbauen zu müssen. Dies wirkt sich insbesondere bei der Ausrichtung und Kalibrierung der Kameras aus, da vor allem die endgültige Kameraausrichtung nur im eingebauten Zustand erfolgen kann.

6.2.4 Hüllsystem

Durch Sonnenlicht, Reflexionen an glänzenden Oberflächen und die Beleuchtung des Arbeitsraumes entstehen Lichtquellen, die nur bedingt kontrolliert werden können. Das Hüllsystem hat die Aufgabe Umgebungslicht auszublenden und somit im Inneren des Ziehversuchsstandes reproduzierbare Beleuchtungsverhältnisse zu schaffen. Für eine Verdunkelung des Messraumes ist es ausreichend einen Lichtschutz unterhalb der Ziehbuchsenaufnahme anzubringen. Voruntersuchungen zeigen, dass die Stempelstange den Einfall eines signifikanten Streulichtanteils durch die Ziehbuchse verhindert. Aufgrund der hohen Verfügbarkeit werden für die Verdunklung Zuschnitte aus Karton (vgl. **Anhang G**) an den Versuchsstand angebracht, die einen ausreichenden Schutz vor Streulicht bieten.

6.3 Ausrichtung und Kalibrierung der Hardware

Für die Ausrichtung der Kameras muss zum einen die Verschiebung des Bildmittelpunktes in Richtung der Bildkoordinaten (x, y) und zum anderen die Drehung um die senkrecht zur Bildebene stehende z -Achse beachtet werden. Hierfür wird eine Methode implementiert, die auf die Bilder, die von der Kamera aufgezeichnet werden, ein Hilfsgitter projiziert. Durch dieses Gitter kann die Kameraposition und -drehung bei einer Echtzeit Bildübertragung an parallelen Kanten im Bild, beispielsweise den Seiten der Stempelstange ausgerichtet werden [32].

Die Kalibrierung der Kameras erweist sich indessen als aufwändiger, muss jedoch nur einmal durchgeführt werden. Aufgrund der in **Abschnitt 2.3.3** vorgestellten Verzeichnung, muss für eine photogrammetrische Messung die Verzeichnungsmatrix **D** der Kamera bestimmt und das Bild gegebenenfalls korrigiert werden. Eine Korrekturfunktion kann gefunden werden, indem über die Matrixelemente d_{xy} eine Regression berechnet wird. Nach [33] kann die Verzeichnungsmatrix durch den Vergleich eines Réseaugitters¹⁵ und einem Bild, auf dem Markierungen mit exakt bekannter Position dargestellt sind, berechnet werden.

Konkret bedeutet das, dass für die Kalibrierung ein Bild aufgezeichnet werden muss, auf dem (idealerweise gitterförmig) Markierungen zu sehen sind. Tritt keine Verzeichnung auf, sind die Markierungen deckungsgleich mit den Réseaupunkten. Andernfalls berechnet sich der Betrag der Verzeichnung durch

¹⁵ Das Réseaugitter kann als äquidistantes Gitter in der Bildebene verstanden werden.

$$d_{xy} = |\mathbf{D}_{xy} - \mathbf{R}_{xy}| = \left| \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \end{pmatrix} \right| \quad (6)$$

Die Richtung der Verzeichnung ist gleich der radialen Richtung am Punkt \mathbf{R}_{xy} . Für die Bestimmung der Verzeichnung wird ein Ausdruck des in **Anhang H** befindlichen Testfeldes formatfüllend fotografiert und durch das auf der beigefügten DVD gespeicherte Python-Skript¹⁶ CALIBRATION.PY ausgewertet. Dieses unterteilt das eingelesene Bild in einzelne um die Réseaupunkte symmetrische quadratische Segmente der Breite des Réseaugitterabstandes. Bei der anzunehmenden Verzeichnung von einigen Pixeln ergeben sich auf diese Weise Segmente, die jeweils eine kreisförmige Markierung darstellen. In diesen Segmenten wird durch eine Hough-Transformation¹⁷ die Lage der kreisförmigen Markierungen bestimmt. Der so berechnete Kreismittelpunkt entspricht dem Vektor \mathbf{D}_{xy} . Nach der Anwendung dieses Verfahrens auf alle Segmente ergibt sich das in **Abbildung 6.6** dargestellte Verzeichnungskennfeld. Exemplarisch sind hier Segmente aus der rechten oberen Bildecke (**Abbildung 6.6 r. o.**) sowie der Bildmitte (**Abbildung 6.6 r. u.**) dargestellt.

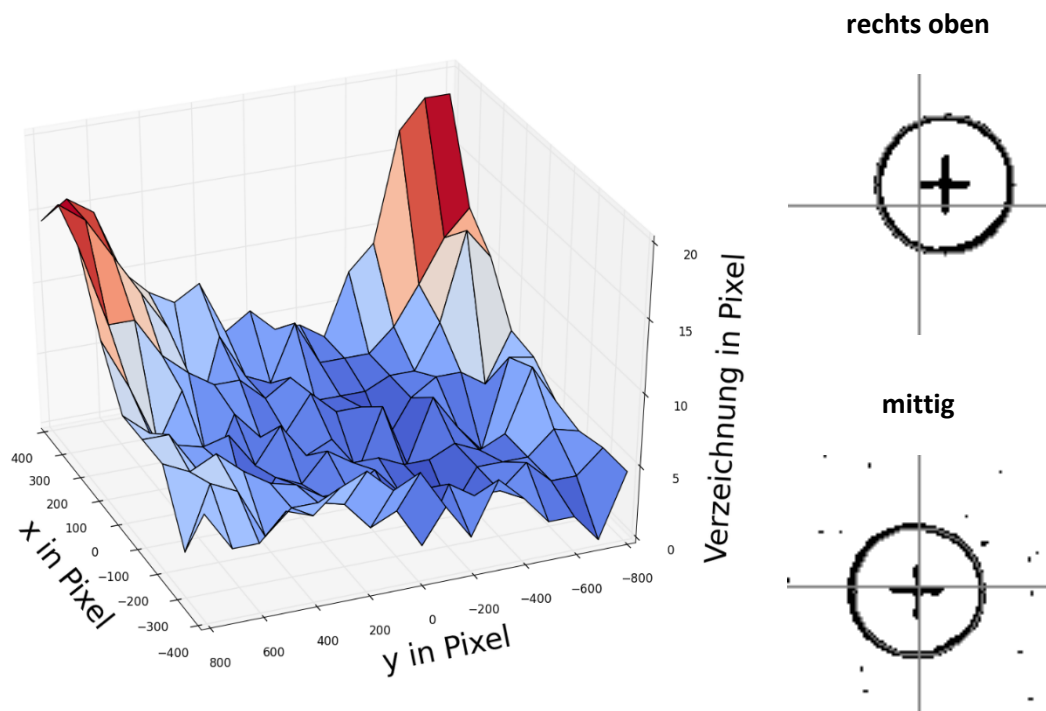


Abbildung 6.6: Verzeichnungskennfeld der Kameras

Insgesamt fällt auf, dass in der Bildmitte erwartungsgemäß eine sehr geringe Verzeichnung von rund 0-4 Pixel auftritt. Der Bildausschnitt, der für die Messung relevant ist, liegt vollständig in einem

¹⁶ /Programmierung/inlineFaltenauswertung/calibration.py

¹⁷ Die Hough-Transformation ist ebenfalls in **Anhang H** erläutert.

Bereich geringer Verzeichnung. Unter Beachtung der Fehler, die bei der Berechnung der Markierungsmittelpunkte durch die Hough-Transformation auftreten können, wird die Verzeichnung als so gering bewertet, dass keine Korrektur notwendig ist.

Da gezeigt werden konnte, dass die Verzeichnung wie zu erwarten um den Kamerahauptpunkt am geringsten ist, kann hier die global gültige Auflösung bestimmt werden. Dazu werden die horizontalen, wie vertikalen Abstände zwischen benachbarten Markierungen um den Kamerahauptpunkt in Pixel gemessen. Anschließend wird der Abstand in Millimeter durch den arithmetischen Mittelwert der Messungen in Pixel geteilt, wodurch eine Auflösung von $U = 0,06 \text{ mm/Pixel}$ berechnet werden kann.

7 Softwareseitige Umsetzung des Gesamtsystems

7.1 Strukturierung der Softwarekomponenten

7.1.1 Grundlegender Aufbau der Module

Für die softwareseitige Umsetzung der Steuerung und Datenverarbeitung wird die Programmiersprache Python 2.7¹⁸ verwendet. Diese erlaubt die Erstellung von Programmen, denen unterschiedliche Programmierparadigmen, wie beispielsweise objektorientierte oder funktionale Programmierung, zugrunde liegen. Python zeichnet sich dadurch aus, dass sich eine große Anzahl frei verfügbarer externer Programmbibliotheken in eigene Projekte einbinden lassen. Insbesondere die objektorientierte Programmierung (OOP) ermöglicht eine gute Strukturierung eines größeren Softwareprojekts, was sich positiv auf die Implementierungs- sowie Testphase und spätere Wartung des Quellcodes auswirken kann.

Für die OOP werden reale Objekte mit ihren typischen Eigenschaften (Attribute) und Fähigkeiten (Methoden) auf allgemeine Programmstrukturen (Klassen) abgebildet. Durch die Erzeugung einer Instanz einer Klasse wird ein konkretes reales Objekt im Programm repräsentiert. Ausgehend von dem Funktionsbereich Signal des Funktionsmodells in **Abbildung 5.1**, können die folgenden Teilaufgaben identifiziert werden, für die jeweils eigene Klassen zu implementieren sind:

- **Benutzerschnittstelle (UI):** durch grafische Kontrollelemente erlaubt diese dem Benutzer die Interaktion mit der Software, als zentraler Einstiegspunkt übernimmt die Benutzerschnittstelle zudem die Verwaltung der übrigen Klassen
- **Kameraschnittstelle:** diese kapselt die Steuerungsaufgaben der Kamera, nimmt Einstellungen vor und stellt Methoden bereit, mit denen auf die aufgezeichneten Bilder zurückgegriffen werden kann
- **Datenaufbereitung:** bereitet die Daten so auf, dass eine Detektion von Falten in den Rohdaten ermöglicht wird
- **Faltendetektion:** hierbei werden durch geeignete Methoden die Informationen des Faltenbildes aus aufbereiteten Daten gewonnen
- **Datenbankschnittstelle:** diese übernimmt alle zur Speicherung der Daten notwendigen Schritte sowie die Kommunikation mit einer Datenbank

¹⁸ Die zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit aktuellste Version ist Python 3.4. Diese wird jedoch aus Kompatibilitätsgründen zu den eingesetzten externen Modulen und Bibliotheken nicht verwendet.

7.1.2 Grafische Benutzeroberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche erstellt zum Programmstart alle nötigen Instanzen der Klassen und dient überdies der Interaktion zwischen Benutzer und Programmsystem. Wie **Abbildung 7.1** illustriert, nimmt den überwiegend Teil der Oberfläche der Bereich zur Echtzeit- und Ergebnisvorschau ein. Hier kann die Videoübertragung aus dem Versuchsstandinneren sowie eine Vorschau auf die aufbereiteten Rohdaten angezeigt werden. Darüber hinaus kann der Vorschaumodus ein- und ausgeschaltet und die Zuordnung der Kameras zur MD- bzw. CD-Richtung manuell getauscht werden. Eine Statusanzeige gibt durch eine Textausgabe Auskunft über den Zustand des Programmsystems.

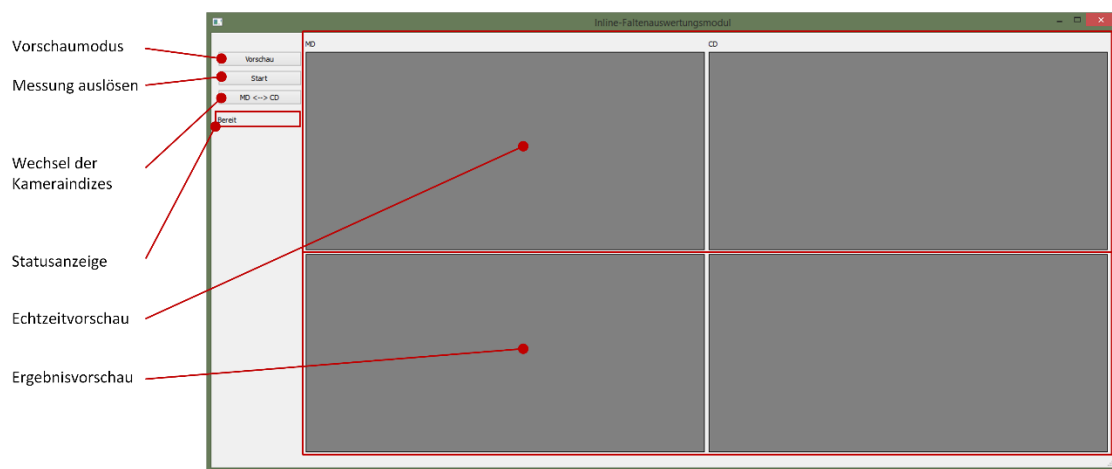


Abbildung 7.1: Grafische Benutzeroberfläche

7.1.3 Ansteuerung des Kamerasystems

Die Steuerung der Kameras wird unter Zuhilfenahme von Klassen und Methoden der externen Bibliothek OpenCV umgesetzt [34]. Diese stellt die Klasse VIDEOCAPTURE bereit, die speziell für Kommunikation mit Webcams entwickelt wurde [35]. Jede Kamera, die über diese Klasse angesprochen wird, erhält einen Index, über den sie adressiert werden kann. Zudem erlaubt sie die Einstellung der Sättigung sowie der Helligkeit (nach [36] als Dunkelstufe bezeichnet).

Die entwickelte Klasse WEBCAM.PY kapselt die teilweise aufwendigen und für Ungeübte schwierigen Operationen in zwei Methoden CAPTUREFRAME() und CUTFRAME() sowie verschiedene Konstanten, für die Sättigung und Helligkeit sowie die Breite des Rahmens, der von CUTFRAME() vom aufgezeichneten Bild beschnitten wird. Dies ist notwendig, da auf dem aufgezeichneten Bild im Randbereich Hintergrundobjekte zu sehen sind, die sich bei der Auswertung der Bilder als störend erweisen.

7.1.4 Datenauswertung und –speicherung

Für die Speicherung der Versuchsdaten wurde der in [31, S. 110] vorgeschlagene Datenbankentwurf weiterentwickelt und als Microsoft Access-Datenbank realisiert. Diese verfügt über eine offene Kommunikationsschnittstelle (ODBC), auf die mit der Python-Bibliothek PYODBC zugegriffen werden kann. Durch den Austausch von SQL-Befehlen ermöglicht die Bibliothek das Einfügen von Datensätzen, bestehend aus Einflussgrößen und Zielgrößen (n_F , \bar{x}_F , σ_F – getrennt nach MD und CD). Diese werden in einer Instanz der Klasse DATASET.PY strukturiert gespeichert und an die Klasse ODBCDATABASE.PY übergeben. In letzterer sind Methoden implementiert, die geeignete SQL-Befehle aus den Daten zusammensetzen und diese über die ODBC-Schnittstelle an die Datenbank weiterleiten. Hierfür enthält die Klasse ODBCDATABASE.PY alle nötigen Primärschlüssel der Datenbank als Konstanten. Für die eindeutige Identifizierung eines Versuchsdatensatzes werden die einzelnen Datensätze mit Zeitstempeln sowie einer laufenden Nummer versehen.

7.1.5 Import von Daten der Versuchsstandsteuerung

Für die Datenspeicherung und –auswertung ist es nicht nur entscheidend Zielgrößen zu speichern. Eine automatisierte Datenauswertung kann nur stattfinden, wenn auch Einstellparameter mit den Zielgrößen verknüpft werden. Die manuelle Datenübertragung in die Datenbank ist jedoch ein aufwändiger, zeitintensiver Prozess, der zudem fehleranfällig ist. Durch die OPC-Schnittstelle wird indes ein automatisierter Import der Daten bezüglich Einstellparameter direkt aus der SPS des Versuchsstandes ermöglicht [37, 38]. Hierfür stellt ein OPC-Server, der auf dem Steuerungsrechner des Versuchsstandes betrieben wird, die Daten der SPS für den Zugriff über eine TCP/IP¹⁹ Schnittstelle bereit. Ein Client kann dann die standardisierten Daten über ein lokales Netzwerk auslesen [39].

Die hier entwickelte Steuerungssoftware implementiert einen solchen Client, dessen Funktionalität durch einen OPC-Serversimulator praktisch nachgewiesen werden konnte. Da für den Betrieb des OPC-Servers dauerhaft Administratorenrechte auf dem entsprechenden PC vorhanden sein müssen, konnte im Rahmen dieser Arbeit kein automatisierter Datenimport durchgeführt werden. Die Einstellparameter werden zunächst händisch übertragen.

¹⁹ Durch das TCP/IP Netzwerkprotokoll kann in einem lokalen Netzwerk auf einen Teilnehmer (bspw. PC) des Netzwerkes über dessen IP-Adresse zugegriffen werden.

7.2 Neuentwicklung des Analysealgorithmus

7.2.1 Motivation zur Neuentwicklung

Für die Auswertung der Bilder, die durch die Kameras aufgezeichnet wurden, werden Methoden benötigt, die es erlauben die Position einzelner Falten zu bestimmen. Mit den bisher entwickelten Methoden [21] konnten jedoch keine realistischen Ergebnisse bei der konkreten Umsetzung des Faltenauswertungsmoduls erzielt werden, obwohl für den menschlichen Betrachter die Falten durchaus auf den aufgezeichneten Bildern erkennbar sind. Ausgehend von der Frage, warum ein menschlicher Beobachter die Falten erkennen kann, der vorhandene Algorithmus die Falten jedoch nicht „sieht“, konnten durch eine Recherche folgende Teilprobleme identifiziert werden.

1. Der menschliche Sehapparat ist für kleine Ortsfrequenzen selbst bei hohem Kontrast unempfindlich. Gleiches gilt für sehr hohe Ortsfrequenzen, wodurch ein Mensch die Beleuchtungsunterschiede, die sich durch die Zargenrundung ergeben, sowie unvermeidliches Bildrauschen nicht wahrnimmt. Mittlere Ortsfrequenzen, wie sie durch die Faltenstrukturen auftreten, können dagegen auch bei sehr geringen Kontrasten wahrgenommen werden [40, S. 95ff]. Die Kontrastunterschiede der Faltenstrukturen sind für die bisherige Umsetzung durch die niederfrequente Überlagerung jedoch nicht ausreichend.
2. Falten können durch Rauschen teilweise in ihrer Länge unterbrochen dargestellt werden. Bei einem Algorithmus, der lediglich eine einzelne Bildzeile betrachtet, werden diese Fehlstellen falsch negativ klassifiziert. Da diese Fehlstellen nur von geringer ebener Ausdehnung sind, trifft das menschliche Gehirn mit hoher Sensitivität die Entscheidung, dass sich auch an einer Fehlstelle eine Falte befindet, wenn sich in deren Umgebung (ober- und unterhalb) Faltenstrukturen deutlich abzeichnen²⁰. Es handelt sich dabei um sogenannte amodale oder auch subjektive kognitive Figuren, die das Vorhandensein verdeckter Objekte *wahrscheinlich* machen [41, S. 145ff].
3. Reziprok dazu werden helle Fehlerstellen von Algorithmen häufig falsch positiv erkannt. Das menschliche Gehirn ist jedoch in der Lage einen Abgleich der Fehlstelle mit einem gelernten Muster durchzuführen, der anzeigt, dass die Fehlstelle und das Muster nur eine geringe Ähnlichkeit aufweisen.

²⁰ Dieses Phänomen wird als subjektive kognitive Kontur bezeichnet. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist das nach Gaetano Kanizsa benannte Kanizsa-Dreieck, bei dem der Eindruck des Vorhandenseins eines weißen Dreiecks auf weißen Hintergrund durch subjektive Konturen erzeugt wird. (vgl. Abbildung in [41, S. 145])

Auf diesen Teilproblemen aufbauend wird nachfolgend ein Verfahren vorgestellt, das in der Lage ist, eine Lösung für diese Herausforderungen zu finden.

7.2.2 Ausgleich der Beleuchtungsunterschiede

In **Abschnitt 2.3.2** wurde die Fouriersynthese als Verfahren vorgestellt, welches bestimmte Frequenzanteile in einem Signal verändern kann. Wird das Bild als Signal verstanden, muss das Spektrum im Gegensatz zur vorgestellten Fouriersynthese um eine zweite Dimension ergänzt und dadurch auch die Richtung der sich überlagernden Schwingungen beachtet werden. **Abbildung 7.2** zeigt dies anhand einer ebenen Schwingung in x-Richtung und der gleichen Schwingung, welche durch eine um 45° gedrehte Schwingung gleicher Frequenz und Amplitude überlagert ist. [19, S. 375ff]

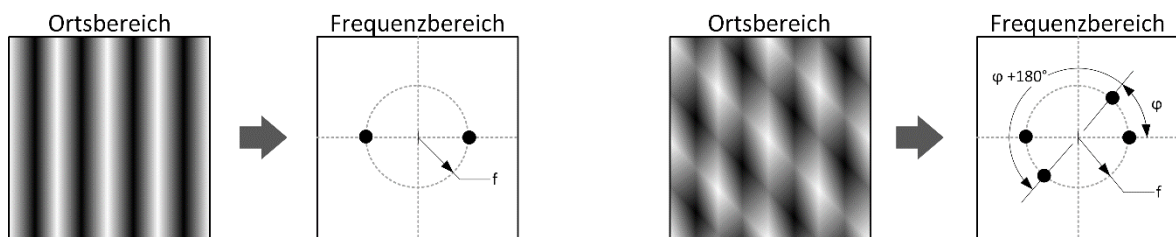


Abbildung 7.2: Ebene Schwingungen und deren Frequenzspektren

Somit gibt ein Punkt im zweidimensionalen Frequenzspektrum durch seinen Mittelpunktabstand die Frequenz, durch seinen Winkel zur x-Achse die Richtung der Schwingung, sowie farbcodiert den Betrag der Amplitude an. Charakteristisch ist die Punktsymmetrie des Spektrums.

Auch bei der ebenen Filterung von Frequenzen kann es zum Fenstereffekt kommen. Durch die Wahl einer geeigneten Fensterfunktion, kann dessen Auswirkung jedoch auf ein Minimum reduziert werden. Dies kann durch die Multiplikation des Frequenzspektrums mit der in **Abbildung 7.3** dargestellten auf zwei Dimensionen erweiterten Gaußkurve erreicht werden. [42, S. 224ff]

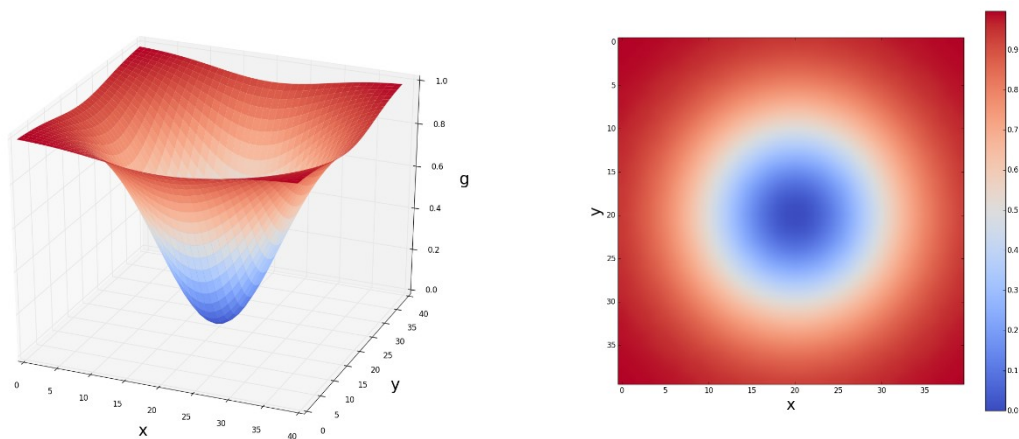


Abbildung 7.3: Zweidimensionale Gaußkurve als Fensterfunktion zur Frequenzfilterung nach [43]

Des Weiteren werden die hohen Frequenzen im Randbereich abgeschnitten, wodurch das Rauschen unterdrückt werden kann. **Abbildung 7.4** zeigt das Ergebnis dieser Operation und einer anschließenden Histogrammspreizung des rücktransformierten Bildes. Es kann deutlich erkannt werden, dass der graduelle Beleuchtungsunterschied unterdrückt und somit der Kontrast der Falten erheblich verbessert werden konnte.

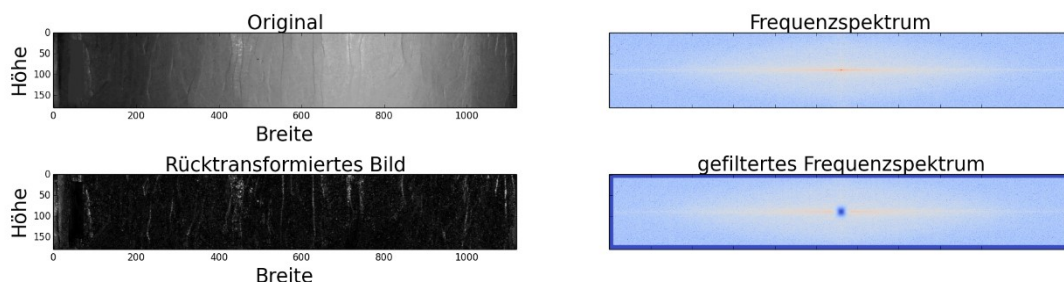


Abbildung 7.4: Beleuchtungsausgleich durch zweidimensionale Fouriersynthese

7.2.3 Mustersuche anhand des Modells einer idealen Falte

Um einen Bildausschnitt mit einem Musterbild einer idealen Falte zu vergleichen, muss zunächst festgelegt werden, welche Eigenschaften eine ideale Falte aufweist. Dazu muss das Musterbild typische Eigenschaften realer Falten vereinen, hierbei insbesondere die in **Abschnitt 7.2.1** erläuterte ebene Ausdehnung. Bei näherer Betrachtung der frequenzgefilterten Bilder zeigt sich, dass Falten dadurch charakterisiert sind, dass sie sich hell vom dunklen Hintergrund abheben. Durch die Filterung entsteht jedoch kein Helligkeitssprung, sondern ein annähernd symmetrischer gradueller Verlauf. Die Falten verlaufen nahezu vertikal. Demzufolge kann ein Musterbild einer

idealen Falte durch ein Bild approximiert werden, dessen horizontaler Grauwertverlauf einer Normalverteilung folgt. Um die Schiefstellung realer Falten zu berücksichtigen, wird die Musterfalte breiter als reale Falten abgebildet.

Ein geeignetes Verfahren zum Vergleich zweier Bildausschnitte stellt die Kreuzkorrelation dar. Hiermit wird ermöglicht ein Ähnlichkeitsmaß zwischen einem Musterbild (Template **T**) und einem Ausschnitt (Source **S**) aus der Grauwertmatrix **G** zu berechnen. Dazu wird die Umgebung des Punktes (τ, u) mit n Pixeln gebildet durch (vgl. **Abbildung 7.5**)

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(\tau, u) = \left\{ G_{ij} \mid i \in \left(\tau - \frac{\sqrt{n}}{2}, \tau + \frac{\sqrt{n}}{2} \right) \wedge j \in \left(u - \frac{\sqrt{n}}{2}, u + \frac{\sqrt{n}}{2} \right) \right\} \quad (7)$$

wodurch **S** einen um (τ, u) symmetrischen Bildausschnitt darstellt und n Pixel umfasst. Eine Pixelanzahl von $n = 400$ konnte bei Voruntersuchungen als geeignet identifiziert werden (vgl. **Anhang J**).

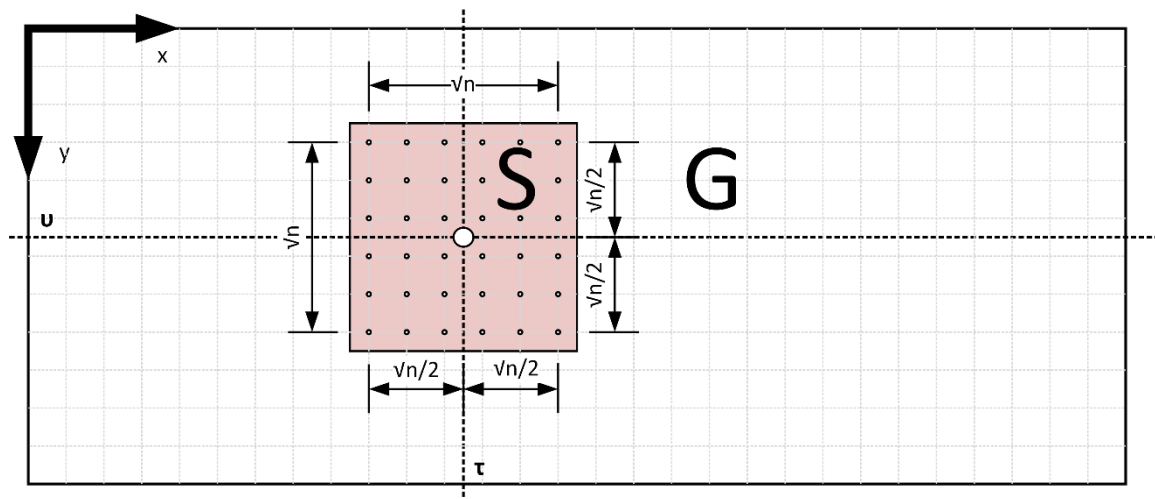


Abbildung 7.5: Bildung des Ausschnitts **S** aus der Grauwertmatrix **G**

Wird das Musterbild nun sukzessiv durch Variation von τ und u über die Grauwertmatrix verschoben, ergibt sich die Kreuzkorrelationsfunktion. Damit der Vergleich zwischen **S** und **T** am Punkt (τ, u) übersichtlich dargestellt werden kann, wird der \star -Operator eingeführt [19, S. 440]:

$$R_{ST}(\tau, u) = (\mathbf{S} \star \mathbf{T})(\tau, u) = \frac{\sigma_{ST}}{\sigma_S \cdot \sigma_T} \quad (8)$$

wobei gilt

$$\sigma_{ST} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i \sum_j [(s_{ij} - \bar{s}) \cdot (t_{ij} - \bar{t})] \quad (9)$$

sowie

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (S_{ij} - \bar{S})^2}{n}} \text{ und } \sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (T_{ij} - \bar{T})^2}{n}} \quad (10)$$

Bei näherer Betrachtung der **Gleichung (8)** bis **(10)** fällt auf, dass die Kreuzkorrelationsfunktion der auf das Intervall $[-1, 1]$ normierten Kovarianz der Bilder **S** und **T** entspricht [44, S. 31f].

Abbildung 7.6 zeigt die Funktionsweise der Kreuzkorrelation an zwei typischen Beispielen.

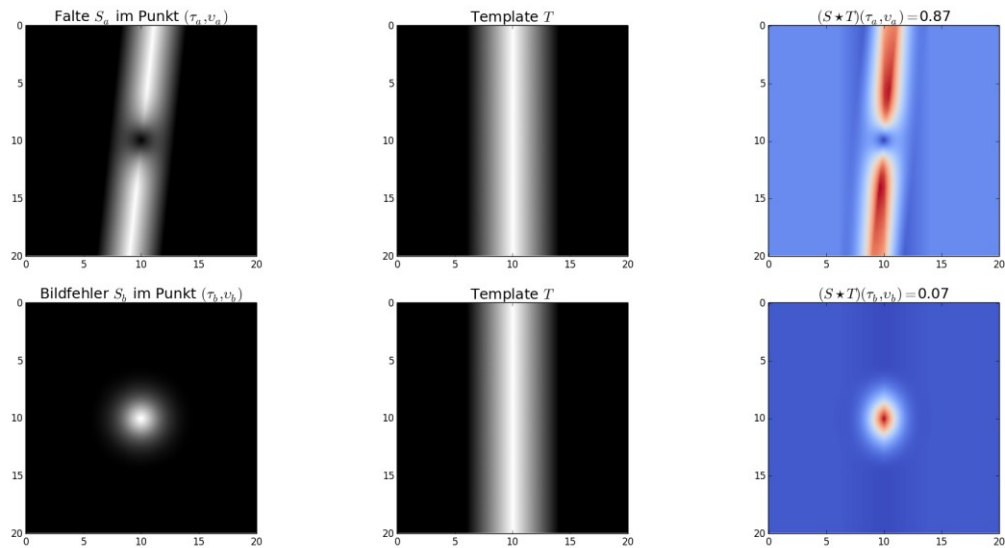


Abbildung 7.6: Ergebnis der Kreuzkorrelationsfunktion an charakteristischen Beispielen

Im oberen Bereich von **Abbildung 7.6** sind eine unterbrochene schiefe Falte, das Musterbild und das Ergebnis der Kreuzkorrelation beider Teilbilder dargestellt, unterhalb davon kann das Verhalten bei einer Bildstörung beobachtet werden. Weichen die Grauwerte an einem Punkt (i, j) in **S** und **T** in die gleiche Richtung vom jeweiligen Mittelwert ab, ergibt sich ein positiver Beitrag zur Summe in **Gleichung (9)**. Hohe Kreuzkorrelationskoeffizienten können als gute Übereinstimmung mit dem Musterbild interpretiert werden. Stimmen **S** und **T** nur in wenigen Regionen überein, sinkt der Betrag von $(S \star T)(\tau, \nu)$. Infolgedessen kann ein Maximum der Funktion $(S \star T)$ als Falte an der Position (τ, ν) betrachtet werden.

Für reale Bilder, die durch das Messsystem gewonnen werden, konnte ein Schwellwert $\Theta = 0.1$ als günstig für die Unterscheidung von Maximalstellen ermittelt werden, der zu Ergebnissen vergleichbar dem in **Abbildung 7.7** führt. Insgesamt kann gezeigt werden, dass auch Falten, die einen geringen Kontrast aufweisen, erkannt werden können.

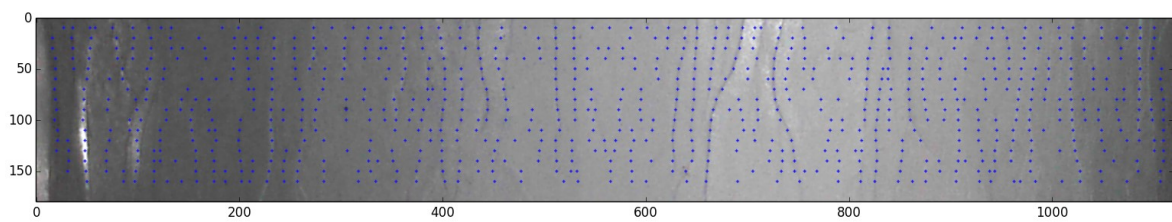


Abbildung 7.7: Ergebnis der Mustersuche durch Kreuzkorrelation

Hierfür wurde jede zehnte Bildzeile untersucht, wofür eine Rechenzeit von unter 2 s erzielt werden konnte. Der Versuch durch parallele Programmierung (vgl. [45]) die Rechenzeit zu verringern, wirkt sich negativ aus, da eine zu große Anzahl²¹ von Prozessen bei der Berechnung entsteht. Einen Ansatz zur Senkung der effektiven Rechenzeit kann die Aufteilung des gesamten Analysevorgangs in einen Prozess darstellen. Zwar senkt sich damit nicht die Analysezeit selbst, jedoch können die Bilder beider Kameras auf diesem Weg simultan untersucht werden. Da üblicherweise jedoch nur eine Zargenhöhe untersucht wird, für deren Analyse nur etwa 0,15 s benötigt werden, wird die Rechenzeit für zwei serielle Analysen auf je einer Zargenhöhe (rund 0,3 s) als ausreichend kurz bewertet.

Bewertung des neuen Analyseverfahrens

Um die Korrektheit des neuen Analyseverfahrens zu untersuchen, wurden an verschiedenen Beispielen manuelle Klassifikationen vorgenommen und die Ergebnisse des Analyseverfahrens gemäß **Abschnitt 2.3.1** eingeteilt. Durchschnittlich konnten durch dieses Vorgehen die in **Tabelle 7.1** gegenübergestellten Klassifikationen vorgenommen werden.

Tabelle 7.1: Klassifikation des Analyseverfahrens

	richtig	falsch
positiv	56	4
negativ	alle übrigen Pixel	3

Dies entspricht einer Sensitivität²² von $P(\text{positiv erkannt} \mid \text{tatsächlich positiv}) = 0,949$ und kann damit insgesamt als gutes Ergebnis gewertet werden.

²¹ Ein Prozess pro untersuchtem Punkt.

²² Versuchsbedingungen: 3 Testbilder von Formteilen, die mit gleichen Einstellungen hergestellt wurden, Ausschnitt MD, Bildzeile 20 (entspricht einer Messhöhe von 20 mm). Durchschnitt auf ganze Zahlen gerundet.

7.2.4 Herleitung der Korrekturfunktion

Wie bereits in **Abschnitt 2.2.4** beschrieben, kann eine Abbildung einer Ebene auf die Bildebene leicht skaliert werden. Eine lineare Skalierung ist bei dem vorliegenden Anwendungsfall jedoch nicht zulässig. **Abbildung 7.8** zeigt, wie die gekrümmte Zargenoberfläche auf die Fokusebene abgebildet wird. Dabei ist w die scheinbare Faltenposition, die durch die Kreuzkorrelationsfunktion ermittelt werden kann. Durch die geometrischen Gegebenheiten ist diese jedoch um den Betrag $\varepsilon(w)$ zu klein. Dies wirkt sich direkt auf den mittleren Faltenabstand sowie die Standardabweichung der Faltenabstände aus.

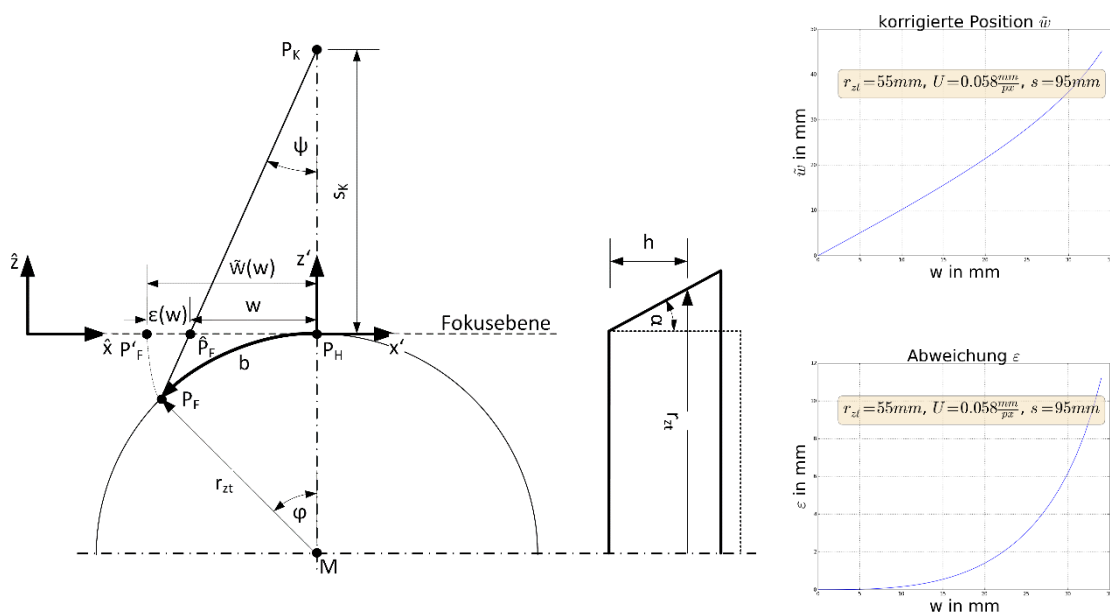


Abbildung 7.8: Projektion eines Zargenpunktes und daraus resultierender Fehler

Wie **Abbildung 7.8** (rechts) zeigt, steigt ε mit zunehmendem Abstand zum Kamerahauptpunkt P_H . Demnach ist eine Funktion $\tilde{w}(w)$ gesucht, die die wahre Bogenlänge zwischen P_H und P_F berechnet. Ausgehend von dem Dreieck $\Delta \hat{P}_F P_H P_K$ kann bei bekanntem Kameraabstand s_K und gemessener scheinbarer Faltenposition w die Steigung des Strahls $\hat{P}_F P_K$ durch

$$m = \frac{s_K}{w} \quad (11)$$

berechnet werden. Somit ergibt sich die Geradengleichung des Strahls zu

$$z = z(x) = \frac{s_K}{w} \cdot x + s_K \quad (12)$$

Der tatsächliche Punkt P_F befindet sich am Schnittpunkt des Strahls und der Zargenoberfläche, welche durch die Kreisgleichung

$$r_{ZT}^2 = x^2 + (z - r_{ZT})^2 \quad (13)$$

modelliert werden kann. Wie **Abbildung 7.8** illustriert, ist der Ziehteilradius r_{ZT} vom Rückstellwinkel α und der Messhöhe h abhängig. Da diese Abhängigkeit mangels Kenntnis von α zunächst nicht berücksichtigt werden kann²³, wird der Radius als konstant angenommen und gleich dem Bodenradius gesetzt. Wird nun (13) nach z aufgelöst und mit (12) gleichgesetzt, ergibt sich die Gleichung

$$r_{ZT} \pm \sqrt{r_{ZT}^2 - x} \cdot \sqrt{r_{ZT}^2 + x} = \frac{s_K}{w} \cdot x + s_K \quad (14)$$

Durch Umstellen von (14) nach der Variablen x kann folgende Gleichung ermittelt werden

$$x(w) = r_{ZT} \pm \frac{w \cdot \sqrt{r_{ZT}^2 \cdot s_K^2 - 2 \cdot r_{ZT} \cdot s_K \cdot w^2 - s_K^2 \cdot w^2}}{s_K^2 + w^2} \mp \frac{r_{ZT} \cdot s_K^2 \mp r_{ZT} \cdot w^2 \pm s_K^2 \cdot w \pm r_{ZT} \cdot s_K \cdot w}{s_K^2 + w^2} \quad (15)$$

Zu beachten sind hierbei die alternierenden Vorzeichen, welche das Vorzeichen von w sowie den Quadranten der Lösung berücksichtigen. Somit ist die x -Koordinate des Punktes $\hat{\mathbf{P}}_F$ bekannt. Des Weiteren gilt durch die trigonometrischen Gegebenheiten

$$x(w) = r_{ZT} \cdot \sin \varphi(w) \quad (16)$$

Im Umkehrschluss berechnet sich der Winkel $\varphi(w)$ durch

$$\varphi(w) = \arcsin \frac{x(w)}{r_{ZT}} \quad (17)$$

Da $\tilde{w}(w)$ der Abwicklung der Bogenlänge $b(\varphi(w))$ entspricht gilt

$$\tilde{w}(w) = b(\varphi(w)) = \varphi(w) \cdot r_{ZT} \quad (18)$$

Diese Gleichung wird als Methode in die Klasse DETEKTION.PY implementiert. Des Weiteren wird in jeder Methode, insbesondere der Abstandsbestimmung, in der mit der Faltenposition gerechnet wird, die korrigierte Faltenposition verwendet.

7.3 Die Versuchsanwendung als Gesamtsystem

Durch das Zusammenspiel des Versuchsstandes und der Messeinrichtung mit der Softwarekomponente, kann das Gesamtsystem ansatzweise als cyber-physisches System (CPS)

²³ Überdies wird der Einfluss als eher gering eingeschätzt.

verstanden werden, wie es im Rahmen von Industrie 4.0 vorkommt. Dieses ist charakterisiert durch die Verbindung der drei Ebenen (vgl. [46, S. 51])

- **Physisches Objekt** – der Versuchsstand und das Faltenauswertungsmodul
- **Datenspeicher** – Access Datenbank, Softwaremodell der Komponenten
- **Dienstsystem** – Algorithmen zur Datenauswertung, ggf. intelligente Assistenzsysteme [31].

Das in **Abbildung 7.9** dargestellte Schaubild zeigt die Vernetzung, die zwischen den oben genannten Komponenten im gegenständlichen Anwendungsfall entsteht.

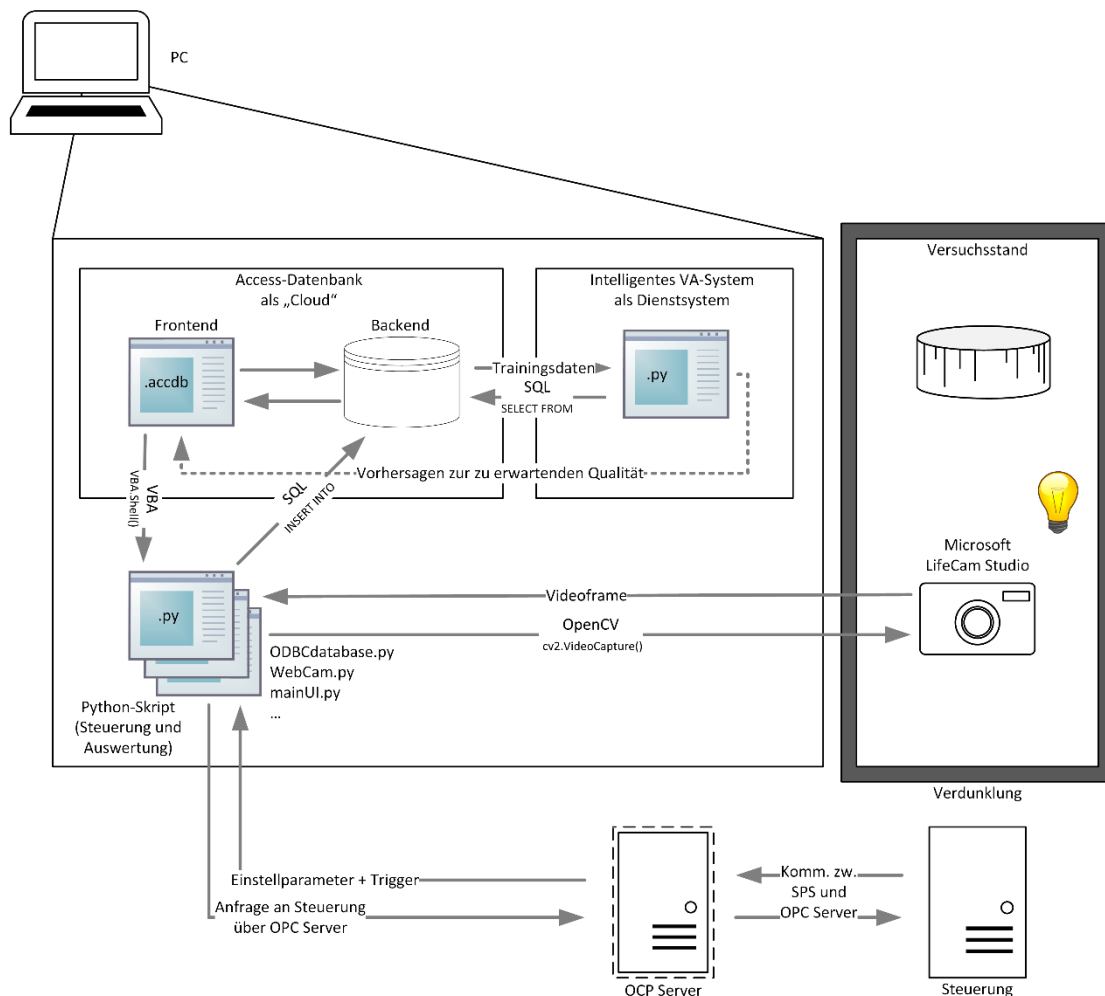


Abbildung 7.9: Gesamtsystem des Inline-Faltenauswertungsmoduls

Das dargestellte intelligente Verarbeitungssystem kann beispielsweise das in [31] entwickelte System sein, das mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen [47] das Systemverhalten des Ziehens von Karton aus den Versuchsdaten abbildet und in der Lage ist zuverlässige Vorhersagen zur zu

erwartenden Ziehteilqualität zu liefern. Dieses ist jedoch an dieser Stelle nur stellvertretend für weitere Algorithmen, aus denen eine Wertschöpfung für den Prozess resultieren kann, eingefügt.

Das Softwaremodell ist als UML-Klassendiagramm und der innere Ablauf als Sequenzdiagramm in **Anhang K** dargestellt. Dies bildet im Grunde den Datenspeicher des CPS. Neben dem in **Abschnitt 7.2** vorgestellten Algorithmus²⁴, ist beispielsweise auch ein Algorithmus zur automatischen Erkennung von Rissen oder anderen Defekten denkbar. Der Versuchsstand selbst sowie das Inline-Messsystem bilden die Menge der physischen Objekte des CPS.

Bisher sind die einzelnen Rechner nicht über das Internet verbunden (vgl. [48]), sondern kommunizieren über ein lokales Netzwerk (LAN) miteinander. Weiterführende Studien können jedoch die Entwicklung von Systemen zum Gegenstand haben, die in der Lage sind über das Internet miteinander zu kommunizieren. So könnte beispielsweise die Datenbank dahingehend angepasst werden, dass auf diese durch Internetkommunikation zugegriffen werden kann. Ferner kann durch die Miniaturisierung der Rechentechnik des Faltenauswertungsmoduls ein Schritt in Richtung eingebettete Sensorik gegangen werden, die in der Lage ist Messdaten nach außen hin zu kommunizieren. Weiterhin ließe sich auch der OPC-Server so konfigurieren, dass dieser Daten über das Internet zur Verfügung stellt. Diese Überlegungen implizieren aber auch die Entwicklung von Systemen zur Sicherung der Daten vor dem Zugriff Unberechtigter.

Durch derartige Entwicklungen entsteht – stets im Hinblick auf eine industrielle Anwendung – die Möglichkeit Prozesse innerhalb der gesamten Lieferkette (Supply Chain) zu optimieren. Für den betrachteten Anwendungsfall kann dies beispielsweise die Bereitstellung von Packstoff einer bestimmten Spezifikation sein oder die Prozesssteuerung für die individualisierte Fertigung von Kartonformteilen für wechselnde Packgüter.

²⁴ Der Quellcode des Algorithmus sowie weitere wichtige Quellcodefragmente können in **Anhang L** eingesehen werden. Der gesamte Quellcode befindet sich zudem auf der beigelegten DVD. Die eingesetzten Bibliotheken Dritter sind in **Anhang M** aufgeführt und beschrieben.

8 Verifizierung und Validierung des Faltenauswertungsmoduls

8.1 Verifizierung

Es zeigt sich, dass bei einer Prüfung der Komponenten Konformität mit den Anforderungen erzielt werden kann (vgl. [49, S. 41]). Die Komponenten sowie deren Interaktion miteinander entsprechen dabei der geplanten Funktionsweise (s. Anmerkung in **Anhang N**). Auch der neu entwickelte Analysealgorithmus, beruhend auf spektraler Filterung und der Kreuzkorrelation mit einem Musterbild, ist in der Lage zuverlässig Falten zu detektieren und hält dem Vergleich mit einer händischen Auswertung stand (s. **Abschnitt 7.2.3**).

Das Messsystem vermag die Falten und deren Verteilung in situ zu charakterisieren. Die aus der Aufgabenstellung hervorgehende Entwicklung eines Inline-Messverfahrens kann somit als erfüllt betrachtet werden. Mit einer durchschnittlichen Mess- und Analysezeit von unter 1 s übertrifft das Messsystem die gesetzten Ziele. Im Rahmen der Versuchsdurchführung konnten sämtliche Messungen ohne unerwartete Zwischenfälle durchgeführt werden, wodurch das Faltenauswertungsmodul insgesamt eine hohe Zuverlässigkeit aufweist. Da somit die generelle Eignung des Inline-Messverfahrens nachgewiesen werden konnte, wird das System als verifiziert²⁵ betrachtet.

8.2 Validierung

8.2.1 Validierungsziel

Bisher ist ein Vergleich von Faltenverteilungen nur zwischen Messungen möglich, die mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren ermittelt wurden. Um eine Aussage über die Gültigkeit dieser Messungen machen zu können, müssen diese anhand von Referenzmessungen validiert²⁶ werden.

Die gewonnenen Messergebnisse werden mit Ergebnissen einer ausgewählten Referenzmessmethode verglichen und durch eine Bewertung der Übereinstimmung mit dieser Methode beurteilt. Grundlegende Verfahrensunterschiede wirken sich dabei in einer nicht vermeidbaren Abweichung aus, deren Signifikanz als Maß der Übereinstimmung verwendet wird. Eine Design-Validierung wurde bereits im Laufe der Entwicklung durchgeführt. Die nachfolgende Validierung entspricht der Phase Leistungsvalidierung [51] und versucht somit die Validierung unter realen

²⁵ Verifikation: Nachweis der generellen Eignung entsprechend den Anforderungen [50]

²⁶ Validierung: Nachweis der Erfüllung der Anforderungen am spezifischen Anwendungsfall [50]

Produktionsbedingungen durchzuführen. Das Messsystem wird im Rahmen dieser Arbeit als validiert betrachtet, wenn das 95%-Konfidenzniveau beim Vergleich mit der Referenzmessmethode erreicht werden kann.

8.2.2 Validierungsmethoden

Validierung der Korrekturfunktion

Um die Korrektheit der Korrekturfunktion aus **Abschnitt 7.2.4** zu validieren, wird ein Kartonschnitt, der äquidistante Markierungen im Abstand von 5 mm aufweist, um den Stempel gelegt. Auf diese Weise entsteht eine zylindrische Mantelfläche, die nachfolgend durch die Kameras aufgezeichnet werden kann. Es ist darauf hinzuweisen, dass die beim Ziehen entstehenden Abweichungen des Ziehteilradius bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden und die Validierung für einen konstanten Kameraabstand $s_K = 95$ mm durchgeführt wird. Die in **Abbildung 8.1** eingezeichneten Hilfslinien dienen der Ausrichtung der Kamera.

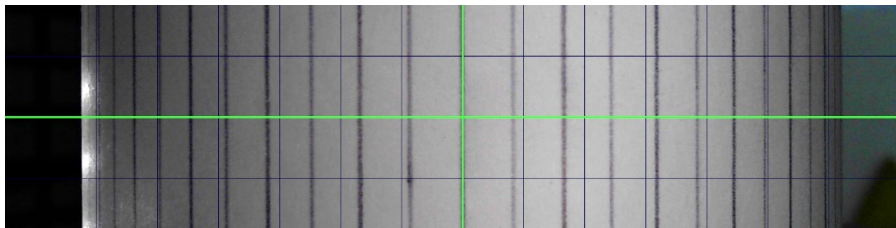


Abbildung 8.1: Äquidistante Markierungen auf dem Stempel zur Validierung der Korrekturfunktion

Im Folgenden wurden manuell unter Zuhilfenahme einer Grafiksoftware die Positionen der Markierungen in x-Richtung auf Höhe der horizontalen grünen Linie bestimmt. Zur Überprüfung inwiefern sich die geometrischen Gegebenheiten beider Kameras gleichen, wurden die Messung in MD- und CD-Richtung durchgeführt. Die Messwerte sind in **Anhang O** hinterlegt. Aus den Messwerten wurden durch Differenzbildung die Abstände der Markierung berechnet. Hierbei ist deutlich sichtbar, dass die Markierungsabstände in den Randbereichen scheinbar kleiner werden.

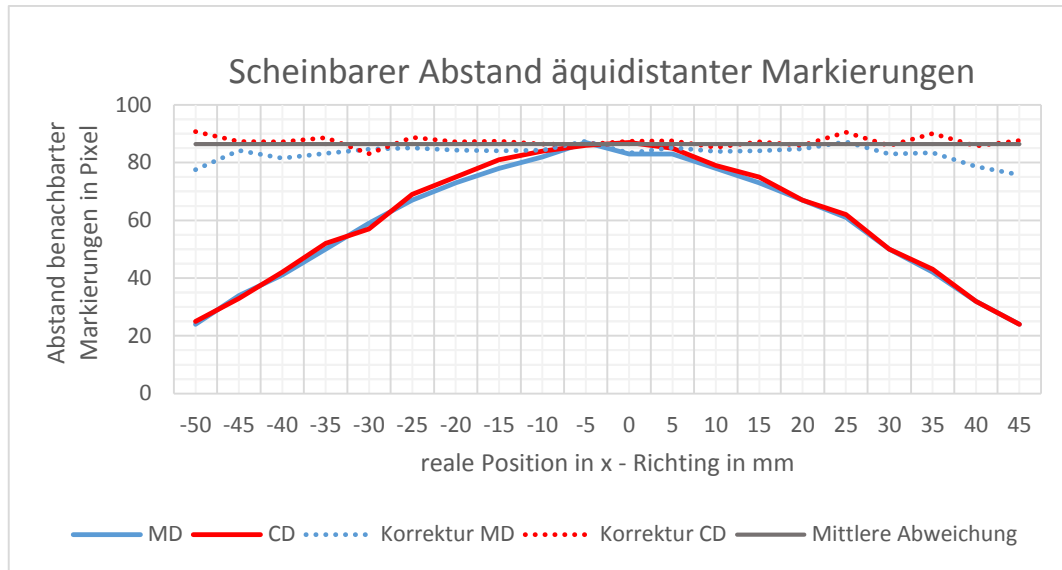


Abbildung 8.2: Auswirkung der Positionskorrektur

Abbildung 8.2 stellt die Markierungsabstände vor und nach der Korrektur gegenüber. Erwartungsgemäß zeigen die korrigierten Abstände einen annähernd konstanten Verlauf, dessen Residuen auf Messfehler bei der Positionsbestimmung der Markierungen zurückzuführen sind. Ferner weisen die korrigierten Abstände im Mittel den gleichen Betrag, wie der Markierungsabstand am Nullpunkt auf. Wird die Markierungsposition über der tatsächlichen Position aufgetragen (vgl. **Anhang O**), weist die Korrektur idealerweise einen linearen Verlauf auf. Bei der Durchführung einer linearen Regression konnte für die korrigierte Position ein Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,999$ berechnet werden. Dies kann als sehr genaue Deckung der korrigierten Messdaten mit der linearen Regression interpretiert werden (idealerweise $R^2 = 1$).

Plausibilitätsprüfung und Auswahl der Referenzmessmethode

Eine Untersuchung der Plausibilität kann durch den Vergleich der Messergebnisse mit den gewonnenen Bilddaten durchgeführt werden. Diese aufwändige Untersuchung beinhaltet die manuelle Erfassung der Faltenanzahl in verschiedenen Bilddaten und überdies die händische Bestimmung der Faltenposition. Auf diese Weise können die Zielgrößen \hat{x}_F und σ_F abgeleitet werden.

Für mehrere Beispielbilder konnte diese Plausibilitätsprüfung erfolgreich durchgeführt werden. Für eine umfassende Untersuchung über den gesamten Merkmalsraum der Einstellgrößen, ist dieses Verfahren jedoch ungeeignet. Aus diesem Grund ist die Auswahl eines Referenzverfahrens notwendig, welches bereits validiert und dokumentiert wurde.

Unter den vorgestellten Messmethoden zeichnet sich insbesondere die Lasertriangulation durch eine hohe Genauigkeit und eine gute Dokumentation von Versuchsergebnissen aus. Somit kann die Validierung des Inline-Faltenauswertungsmoduls anhand der Ergebnisse der Validierung des Lasertriangulationsverfahrens durchgeführt werden.

Aufstellen des Versuchsplans

In [15] wurde ein dreistufiger, vollfaktorieller Versuchsplan [52] aufgestellt, der die Parameter Faltenhalterkraft F_{FH} , Stempeltemperatur T_S und Ziehbuchsentemperatur T_{ZB} wie in **Tabelle 8.1** gezeigt, variiert. Als Ziehmaterial wurde Trayforma mit einer Grammaturn von 350 g/m^2 und ein Ziehteilradius von 55 mm verwendet. Die Messhöhe beträgt 20 mm.

Tabelle 8.1: Parameterstufen des Versuchsplans

	F_{FH}	T_S	T_{ZB}
-1	500 N	80 °C	80 °C
0	3750 N	100 °C	100 °C
1	7000 N	120 °C	120 °C

Hierbei wurde die Faltenhalterkraft beim Ziehen ausgehend von der jeweiligen Faktorenstufe auf 500 N linear abgesenkt. Dem vorliegenden statistischen Versuchsplan liegt ein quadratisches Regressionsmodell zugrunde. In Abstimmung mit [11] wird eine Übereinstimmung mit dem linearen Modellanteil als ausreichend für die Validierung angenommen. Zur Kontrolle wird zusätzlich der Mittelpunkt des Versuchsraums untersucht. Somit sind abgesehen von dem zusätzlich durchgeführten Versuchspunkt nur die Extremwerte der Einstellparameter für die Validierung von Bedeutung. Um eine statistische Absicherung der Messwerte zu erreichen, werden jeweils acht Wiederholungen pro Versuchspunkt durchgeführt.

Untersuchung auf Lagealternativen der Stichprobenmediane

Bei der Versuchsdurchführung entsteht für jeden Versuchspunkt eine Stichprobe von Messwerten. Diese soll nun auf Gleichheit mit der Stichprobe von Messwerten der Referenzmessmethode des gleichen Versuchspunktes untersucht werden. Da beide Stichproben nur über je acht Messwerte verfügen, ist ein Test auf Normalverteilung, als Grundvoraussetzung gängiger statistischer Tests, nur wenig aussagekräftig. Daher wird auf das verteilungsfreie Verfahren des Wilcoxon-Tests auf Lagealternativen für zwei unabhängige Stichproben zurückgegriffen. Mit diesem kann auf einfache

Weise beurteilt werden, ob zwei Stichproben der gleichen Grundgesamtheit entstammen können [53, S. 235ff]. Es gelten die Hypothesen

$$\begin{aligned} H_0: M(x) &= M(y) \\ H_1: M(x) &\neq M(y) \end{aligned} \quad (19)$$

Die Stichproben x mit Elementanzahl n_x und y mit Elementanzahl n_y werden gemeinsam in einer Liste geordnet und die Rangfolge der Elemente bestimmt, sodass gilt

$$\begin{array}{ccccccc} y_{(1)} & \leq & x_{(1)} & \leq & x_{(2)} & \leq & y_{(2)} & \leq & \dots & \leq & y_{(n_y)} & \leq & x_{(n_x)} \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & & & & & \downarrow \\ 1 & & 2 & & 3 & & 4 & & & & & & n_x + n_y \end{array} \quad (20)$$

Anschließend wird die Rangsumme R_x der den Elementen aus x zugeordneten Ränge in

$$|U_x| = \left| R_x - \frac{n_x \cdot (n_x + n_y + 1)}{2} \right| \geq c_{1-\frac{\alpha}{2}; n_x; n_y} \quad (21)$$

eingesetzt. Wird die Ungleichung (21) erfüllt, so wird die Nullhypothese zugunsten der Gegenhypothese mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α abgelehnt, d. h., es liegt eine signifikante Abweichung der Mediane vor. Die Testschranke $c_{1-\alpha/2; n_x; n_y}$ kann in [53, S. 370ff] nachgeschlagen werden. Der Wilcoxon-Test wird für jeden Versuchspunkt durchgeführt, um zu untersuchen, ob ein bestimmter Parameter Einfluss auf die Güte des Messergebnisses hat.

t-Test auf Signifikanz der Mittelwertabweichung

Der Wilcoxon-Test erlaubt zwar die Betrachtung einzelner Versuchspunkte, trifft jedoch keine Aussage über die Qualität des gesamten Versuchsumfangs. Entstammen die Messungen der Versuchspunkte der Referenzmessmethode und der Inline-Faltenauswertung aus der gleichen Grundgesamtheit, gilt

$$\begin{aligned} H_0: \mu_x - \mu_y &= \mu = 0 \\ H_1: \mu_x - \mu_y &= \mu \neq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Über alle Versuchspunkte ergibt sich eine Stichprobe von Mittelwertdifferenzen, welche unweigerlich um Null streuen [26]. Die Signifikanz der Abweichung des Mittelwerts \bar{y} der Mittelwertdifferenzen von dem hypothetischen Mittelwert $\mu = 0$ kann Aufschluss über die Qualität der Messung über den gesamten Versuchsumfang geben. Die Konfidenzgrenzen für μ zur Irrtumswahrscheinlichkeit α berechnen sich nach [52] durch

$$\bar{y} - \frac{t_{f,1-\frac{\alpha}{2}} \cdot s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + \frac{t_{f,1-\frac{\alpha}{2}} \cdot s}{\sqrt{n}}, \text{ mit } f = n - 1 \quad (23)$$

wobei $1-\alpha$ die in **Abschnitt 8.2.1** festgelegte Konfidenzgrenze für die Irrtumswahrscheinlichkeit α ist.

8.2.3 Ergebnisse der Validierung

Die Plausibilitätsprüfung kann aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes nur an drei Proben durchgeführt werden. Für die Bestimmung der Faltenanzahl, des mittleren Faltenabstandes sowie der Standardabweichung der Faltenabstände, konnten Werte ermittelt werden, die Konformität mit den Messwerten der Lasertriangulation zeigen. Auf Basis dieser Stichprobe wird angenommen, dass vergleichbare Grundvoraussetzungen bei der Durchführung der Versuche vorhanden sind. Klimatische Schwankungen während der Versuchsdurchführung konnten jedoch nicht verhindert werden (vgl. **Anhang P**).

Für die Validierung der Ergebnisse werden die Messwerte für n_F , \bar{x}_F und σ_F getrennt nach MD und CD untersucht. Die Messdaten können in **Anhang Q** eingesehen werden. Insgesamt konnte für alle Parameter außer dem Faltenabstand in MD-Richtung (85 %-Konfidenzniveau) nachgewiesen werden, dass der Mittelwert der Differenz der Stichprobenmittelwerte für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht signifikant von null abweicht. Das bedeutet, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modul zur Lasertriangulation gleichwertige Ergebnisse liefern kann. Infolgedessen wird das Inline-Faltenauswertungsmodul als validiert betrachtet.

Zwar werden im Mittel Messdaten bestimmt, die vergleichbar mit denen der Lasertriangulation sind, bei Betrachtung einzelner Versuchspunkte fallen jedoch einige Einschränkungen auf. Werden Einstellungen gewählt, die eine hohe Anzahl von kleinen Falten zur Folge haben, sinkt die Erkennungsrate des Verfahrens. Es werden tendenziell zu wenig Falten erkannt, insbesondere dann, wenn die Parameterstufe 1 für die Faltenhalterkraft gewählt wird. Dadurch, dass die Falsch-Negativ-Rate steigt, wird zudem der mittlere Faltenabstand verfälscht und diesbezüglich eher eine zu hohe Ausprägung gemessen.

8.3 Fehlerdiskussion

Bei der Validierung der Korrekturfunktion konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse in den Randbereichen des Definitionsbereichs sehr sensibel auf die Wahl der Funktionsparameter s_K und

r_{ZT} reagieren. Trotz sorgfältiger Ausrichtung der Kameras kann nicht ausgeschlossen werden, dass geringe Unterschiede in der Parametrierung der Funktion für die Richtungen MD und CD vorhanden sind. Zudem wird die Abhängigkeit des Ziehteilradius vom Rückstellwinkel und der Messhöhe vernachlässigt, was eine Verfälschung der Messergebnisse mit sich bringt.

Ein weiterer Einflussfaktor, welcher den Parameter s_k der Korrekturfunktion beeinflusst, entsteht durch die Verwendung des Autofokus der Kameras. Subjektiv wird zwar der Koordinatenursprung des Objektkoordinatensystems (Punkt P_H , vgl. **Abbildung 7.8**) am schärfsten abgebildet, jedoch kann nicht sichergestellt werden, dass dieser Punkt tatsächlich wie angenommen in der Fokusebene liegt. Dieses Kameraverhalten resultiert aus dem Bestreben einen möglichst großen Bereich von Punkten auf der Objektoberfläche *annähernd* scharf abzubilden. Die reale Fokusebene kann somit um den Betrag Δs_k zu der angenommenen Fokusebene verschoben sein und dadurch das Ergebnis der Korrekturfunktion verändern.

In **Abschnitt 6.2.1** wurde bereits auf die Möglichkeit der Modellierung der Faltenausprägung als stochastischer Prozess verwiesen. Bei der Skalierung der Messergebnisse wurde von einer konstanten Faltendichte ausgegangen. Durch die Anisotropie des Kartons ist die Faltendichte jedoch am Übergang von MD zu CD nicht konstant (vgl. **Abbildung 8.3**). Die lineare Skalierung der Messdaten setzt jedoch eine gleichbleibende mittlere Faltendichte voraus.

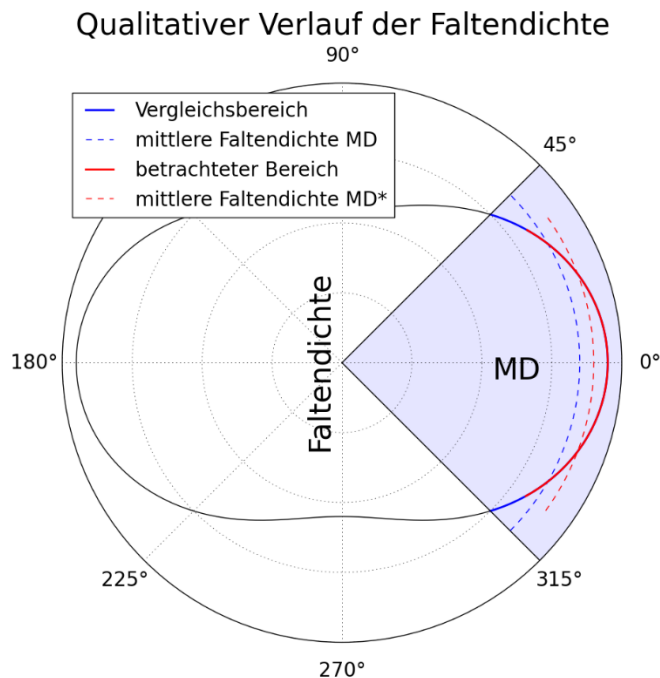


Abbildung 8.3: Qualitativer Verlauf der Faltendichte

Aufgrund der unterschiedlich großen Betrachtungsbereiche bei der Lasertriangulation und der Inline-Faltenauswertung, ist die Skalierung der Messergebnisse mit einem konstanten Faktor nur bedingt geeignet. Die Faltenanzahl des MD Bereichs erscheint bei der Inline-Messung dadurch tendenziell zu hoch, die des CD-Bereichs zu niedrig. Da ein enormer Versuchsaufwand entsteht, um selbst bei konstanten Einstellparametern einen statistisch gesicherten Mittelwert der Faltendichte zu ermitteln, konnten nähere Untersuchungen dazu im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Daher wurde die als vergleichsweise gering eingeschätzte Verfälschung durch die Skalierung in Kauf genommen.

Zudem ist darauf hinzuweisen, dass die Referenzmessmethode zwar mit hoher Genauigkeit das Faltenbild vermisst, jedoch auch hier in gewissen Grenzen Fehler bei der Messung entstehen. Da die Ursachen dieser Abweichungen nicht notwendigerweise die gleichen Ursachen von Messfehlern der entwickelten Inline-Messmethode sein müssen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Korrelation der Ergebnisse in gewissen Grenzen dem Zufall unterliegt.

Überdies konnte weder bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen noch bei den Referenzmessungen Normklima nach [54] aufrechterhalten werden (vgl. **Anhang P**). Der Einfluss dieser klimatischen Schwankungen auf die Messungen ist nur schwer abzuschätzen. Des Weiteren können Chargenunterschiede des verwendeten Kartons zu Abweichungen in den Versuchsergebnissen führen, deren Ausmaß nicht abgeschätzt werden kann.

Ein weiterer möglicher fehlerhafter Einfluss kann durch die Modellbildung der Falte als Musterbild für die Kreuzkorrelationsfunktion entstehen. Als Modell weist dieses prinzipiell Abweichungen zur Realität auf und kann nur bedingt die realen Eigenschaften der Falten vereinen. Insbesondere große Schiefstellungen der Falten vermindern die Wahrscheinlichkeit einer richtig positiven Klassifizierung. Aber auch durch die Tatsache, dass die Fouriersynthese eine Näherungslösung darstellt, können Abweichungen der Messung zur realen Faltenausprägung entstehen.

9 Weiterführende Untersuchungen zum Analyseverhalten anhand praxisnaher Beispiele

9.1 Motivation zur weiterführenden Untersuchung

Neben runden Ziehteilen lassen sich durch Ziehen von Karton auch ovale oder nierenförmige Ziehteile unter Verwendung verschiedenartiger Materialien herstellen (vgl. [5, 55]). Das zur Validierung verwendete Ziehteilformat stellt somit nur einen Bruchteil des möglichen Spektrums dar. Für eine industrienähe Produktion und spätere Markteinführung ist von großem Interesse, inwieweit das Inline-Faltenauswertungsmodul auch für weitere Geometrien und Materialien geeignet ist und an spezifische Randbedingungen angepasst werden muss.

In **Abschnitt 8** wurde nur ein rundes Ziehteil mit spezifiziertem Material untersucht und die Eignung des Inline-Messverfahrens für dieses nachgewiesen. Hierfür wurden verschiedene Bedingungen, insbesondere das Fehlen von Schwärzungen, vorausgesetzt. Im Folgenden werden daher Ziehteile untersucht, die praktischen Anwendungen entstammen könnten und diese Bedingungen verletzen.

9.2 Analyse weiterer Ziehteilgeometrien und Materialien

Ovale Ziehteile

Ovale Ziehteile erweisen sich als durchaus geeignet für die Inline-Faltenauswertung. Bedingt durch den unterschiedlichen Krümmungsradius weicht hierbei die Ausprägung der Falten zwischen MD und CD noch deutlich voneinander ab. Bei der Verwendung des gleichen Materials, das bereits bei der Validierung eingesetzt wurde, können die Falten sicher erkannt werden. Durch die ovale Form muss jedoch die Korrekturfunktion angepasst werden. Dies lässt sich leicht erreichen, indem die Kreisgleichung **(13)** in **Abschnitt 7.2.4** durch

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (24)$$

ersetzt wird.

Nierenförmige Ziehteile

Bisher wurden ausschließlich konvexe Ziehteile untersucht. Durch Ziehen von Karton können indes auch konkave Geometrien realisiert werden [55]. Untersuchungen zeigen, dass diese jedoch nur bedingt für die Inline-Auswertung durch das bestehende System geeignet sind. In den konkaven

Abschnitten entsteht ein Materialmangel, der zu schiefen, teilweise horizontalen Falten, führt. Diese weichen hingegen deutlich von dem eingesetzten Faltenmodell ab und können daher nicht sicher erkannt werden. Nachfolgende Untersuchungen können zeigen, inwiefern die Anpassung des Faltenmodells oder der Einsatz mehrerer Modelle eine erfolgreiche Analyse konkaver Formteile erlaubt.

Ziehteile mit farblich veränderter Oberflächenbeschaffenheit

Farbliche Veränderungen des Materials können beispielsweise durch Schwärzung auftreten. **Abbildung 9.1 a)** zeigt die Ergebnisse der Analyse an einem Ziehteil mit Schwärzungen. Es fällt auf, dass vorrangig die Schwärzungen als Falten erkannt werden. Zudem sind die entstandenen Falten sehr klein, wodurch die Erkennungsrate tendenziell eher niedrig ist. In **Abbildung 9.1 b)** ist ein gleichmäßig eingefärbtes Ziehteil zu sehen, bei dem die Falten vergleichsweise gut erkannt werden. Fehlerhafte Klassifikationen entstehen eher dadurch, dass auch bei diesem sehr kleine Faltenstrukturen vorhanden sind.

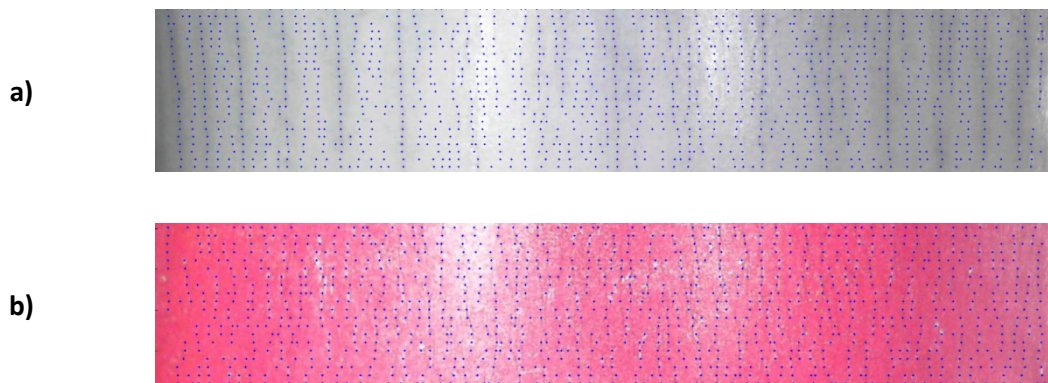


Abbildung 9.1: Faltenerkennung an Ziehteilen mit farblich veränderter Oberfläche

Ziehteile aus Ziehpappe

Bei der Verwendung von Ziehpappe entstehen eher grobe Faltenstrukturen, nur vereinzelt treten Falten auf, deren Ausmaße mit denen der Validierung vergleichbar sind. Unabhängig von der dunkleren Farbe der Pappe lassen sich alle Falten sehr gut automatisch erkennen (vgl. **Abbildung 9.2**). Es ist nun eine Frage der Faltendefinition, ob auch die kleineren Falten gezählt werden sollen. Ist dies nicht gewünscht, kann das Zählverhalten durch die Variation des Schwellwertes Θ der Kreuzkorrelationsfunktion angepasst werden.

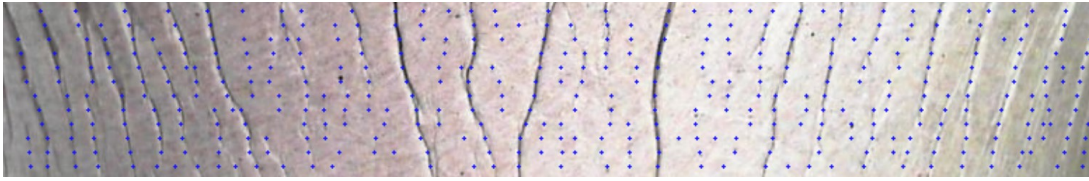


Abbildung 9.2: Faltenerkennung an einem Ziehteil aus Ziehpappe

9.3 Grenzen des Inline-Faltenauswertungsmoduls

Insgesamt zeigt sich, dass das Inline-Faltenauswertungsmodul bei geeigneter Anpassung auch für weitere Anwendungen tiefgezogener Kartonformteile tauglich ist. Voraussetzungen sind vor allem ein hoher Kontrast zwischen Falte und Hintergrund (vgl. schlechte Ergebnisse bei Schwärzung) und eine einheitlich gefärbte Oberfläche. Prinzipiell ist auch die Verwendung verschiedener Materialien möglich. Insbesondere die rot gefärbte Oberfläche in **Abbildung 9.1 b)** zeigt jedoch durch ihren Glanz Schwächen der Beleuchtung auf. Einschränkungen entstehen dadurch bei Materialien, die glatte, glänzende Oberflächen aufweisen.

10 Vorschläge zur technischen Verbesserung des Auswertungsmoduls

10.1 Verbesserung der Sensitivität durch Anpassung der Beleuchtung

10.1.1 Motivation zur Änderung des Beleuchtungssystems

Das bisher eingesetzte Beleuchtungssystem illuminiert den Innenraum des Versuchsstands dauerhaft. Durch die 90°-Anordnung der Kameras musste ein Kompromiss bezüglich der Beleuchtung dahingehend eingegangen werden, dass die benachbarten Beleuchtungselemente teilweise verdunkelt werden, um eine Überbelichtung der aufgezeichneten Bilder zu verhindern. Dadurch entsteht allerdings eine unsymmetrische Beleuchtung der Bilder. Infolgedessen sinkt die Sensitivität in den Randbereichen der Bilder.

Abhilfe kann die serielle Beleuchtung der Zargenabschnitte, welche fotografiert werden, leisten. Auf diese Weise stellt die Überbelichtung kein Problem dar und die Zargen können auch in den Randbereichen gleichmäßiger beleuchtet werden. Dafür ist eine getrennte Steuerung der Beleuchtungselemente notwendig (vgl. **Anhang R**).

10.1.2 Lösungsvorschläge für die Beleuchtungssteuerung

Steuerung durch ein Arduino-Modell

Eine Steuerung der Beleuchtungselemente erfolgt durch die getrennte Stromversorgung selbiger. Diese kann durch die Ansteuerung der GPIO-Pins eines Arduino erfolgen. Bedingt durch deren Ausgangsspannung von 3,3 V – 5 V²⁷ ist die Ansteuerung von Relais und eventuell Transistoren notwendig, die durch den Steuerstrom den Leistungskreis schalten. Vorteil dieser Lösung ist die einfache und kostengünstige Einbindung. Durch die entsprechende Programmierung des Arduino können über die USB-Schnittstelle Befehle zum Schalten der einzelnen Beleuchtungen ausgetauscht werden. Eine dahingehende Anpassung der Steuerungssoftware ist nur wenig zeitaufwändig. Die Entwicklung eines Entwurfs entsprechender Steuerbefehle ist durch deren geringe Anzahl leicht umzusetzen.

²⁷ Die Ausgangsspannung ist modellabhängig.

Steuerung durch einen Raspberry Pi

Prinzipiell ähnelt diese Variante der obigen. Durch Ansprechen der GPIO-Schnittstelle werden die Beleuchtungselemente gesteuert. Auch hier sind Relais und ggf. Transistoren notwendig. Vorteil dieser Variante ist, dass sich die gesamte Anwendung theoretisch auf dem Raspberry Pi ausführen ließe. Möglicherweise ist durch die niedrigere Taktrate der CPU mit einer geringen Einbuße bezüglich der erreichbaren Rechenzeit zu rechnen. Durch die kompakte Bauweise und die Netzwerkfähigkeit des Raspberry Pi wird diese Variante als sehr zukunftsfähig eingeschätzt.

10.1.3 Kostenabschätzung der Lösungsvarianten

Neben der bereits vorhandenen Technik werden für die Lösungsvarianten vor allem die Mikrocontroller benötigt. Zudem ist in gewissem Umfang Peripherie von Nöten, die die Steuerung des Leistungskreises sowie die Kommunikation mit dem Mikrocontroller erlaubt. **Tabelle 10.1** stellt die anfallenden Kosten für je ein ausgewähltes Modell gegenüber.

Tabelle 10.1: Kostengegenüberstellung der Lösungsvarianten

	Arduino Micro	Raspberry Pi Modell B
Mikrocontroller	ca. 20 €	ca. 40 €
Relaiskarte	ca. 25 €	ca. 25 €
aktiver USB-Hub	entfällt	ca. 15 €
USB-Kabel	ca. 5 €	entfällt
gesamt	50 €	80 €

Insgesamt zeigt sich, dass beide Varianten durchaus als kostengünstig zu betrachten sind. Zwar wird die Variante mit dem Arduino als zuverlässig angenommen, die Integration des Gesamtsystems in einen Raspberry Pi verspricht jedoch eine Senkung der Systemkomplexität. Es sind jedoch weiterführende Untersuchungen angeraten, die klären, ob der Raspberry Pi tatsächlich als Grundbaustein des Gesamtsystems geeignet ist.

10.2 Automatische Kamerazuordnung

Für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Anwendung zur Inline-Messung der Faltenverteilung an Kartonformteilen werden zwei Kameras durch jeweils ein USB-Kabel an einen Rechner angeschlossen. Rechnerintern werden für diese Indizes vergeben, über die die Kameras durch das

entwickelte Programm adressiert werden können. Die Vergabe der Indizes lässt sich vom Anwender allerdings nicht steuern, weshalb vor jedem Beginn einer Messreihe die Zuordnung der Kameras zu den Bereichen MD und CD überprüft werden muss.

Alle durch das System aufgezeichneten Bilder weisen einen Ausschnitt des Hintergrunds auf, der für die Messung beschnitten wird. Durch das Füllen dieser unbenutzten Bildbereiche mit Informationen kann eine automatische Zuordnung der Kameras erfolgen. Dies bestätigen auch erste Voruntersuchungen. Die in **Anhang H** näher beschriebene Hough-Transformation kann hierfür Verwendung finden, indem im Innern des Versuchsstandes kreisförmige Markierungen angebracht werden, über deren Lage in den aufgezeichneten Bildern eine eindeutige Identifikation der Kameras ermöglicht wird. Werden die Markierungen so angebracht, dass beispielsweise eine Markierung links unten (MD) und rechts oben (CD) sichtbar ist, kann die Zuordnung automatisiert stattfinden.

Dieses Vorgehen ist jedoch vor allem für die Versuchsanwendung relevant, da die Vergabe der Indizes immer beim Anschluss der Kameras erfolgt. Ein durchgängig arbeitendes System kann deshalb unter Umständen auf eine derartige Automatisierung der Kamerazuordnung verzichten.

10.3 Perspektiven für eine Umsetzung im industriellen Maßstab

Für den Einsatz im industriellen Maßstab werden erhöhte Anforderungen an das Auswertungsmodul gestellt. Insbesondere für die Befestigung ist hierbei eine Variante denkbar, für die im Rahmen dieser Versuchsanwendung ein zu hoher Aufwand entstanden wäre. Wird das Inline-Faltenauswertungsmodul bereits bei der Anlagenkonstruktion vorgesehen, kann eine stabilere Befestigung durch Schrauben berücksichtigt werden. Zudem ist hierbei die Auswahl von Industriekameras in Betracht zu ziehen, da diese für derartige Anwendungen ausgelegt sind. Dies betrifft insbesondere Befestigungsmöglichkeiten, Einstellbarkeit und Bildqualität. In erster Linie kann dadurch jedoch eine Lösung für die lange Fokussierungsdauer gefunden werden. Bezüglich der Beleuchtung bleibt zu prüfen, ob die Lebensdauer der LED-Lichtstreifen den Anforderungen einer industriellen Anwendung gerecht werden kann. Besonderes Augenmerk für den industriellen Einsatz liegt auf der weiteren Automatisierung der Messung. Dafür ist die automatische Auslösung der Messung zum richtigen Zeitpunkt in die Steuerung einer Anlage zum Tiefziehen von Karton zu integrieren.

11 Schlussbemerkungen und Ausblick

Durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messsystem wird eine schnelle Analyse der Faltenbilder von gezogenen Kartonformteilen ermöglicht. Dieses schafft durch einen neuen Auswertungsalgorithmus die Voraussetzung für eine objektive und zuverlässige Bewertung der Ziehteile. Hierfür werden die Faltenanzahl, der Faltenabstand sowie die Standardabweichung der Faltenabstände herangezogen.

Die Fähigkeit zur Inline-Messung verringert die Analysezeit derart stark, dass eine Auswertung der Ziehteile auf industriellem Maßstab denkbar ist. Zudem kann die Auswertung durch die automatische Speicherung der Messergebnisse besser automatisiert werden. Die Betrachtung des Gesamtsystems als CPS bildet die Grundlage für eine Reihe von zukunftssträchtigen Entwicklungen im Rahmen von Industrie 4.0.

Auf Basis der durch die vorliegende Arbeit gewonnenen Erkenntnisse eröffnet sich eine Vielzahl von weiterführenden Untersuchungsmöglichkeiten zur Verbesserung des Ziehprozesses, der Optimierung des Analyseverfahrens und der automatisierten und intelligenten Datenauswertung. Nachfolgend sind ausgewählte Ansätze für weiterführende Studien aufgeführt, die neben den in **Abschnitt 10** erläuterten Verbesserungsvorschlägen als wichtige Optimierungspunkte betrachtet werden.

- Die Versuche, die zur Validierung des Inline-Faltenauswertungsmoduls durchgeführt wurden, haben nur die Betrachtung einer Ziehteilgeometrie und eines Materials vorgesehen. Ansatzweise konnte gezeigt werden, dass durchaus auch andere Materialien durch das Messsystem ausgewertet werden können. Zusätzliche Untersuchungen könnten zeigen, welche Grenzen bezüglich verschiedener Materialeigenschaften, bspw. der Lichtreflexion der Oberfläche, dem Messsystem gesetzt sind. Zudem könnte die Eignung für weitere Geometrien nachgewiesen werden.
- Auf der Versuchsebene sind Fehlereinflüsse, die durch den Benutzer entstehen, kaum zu vermeiden. So entstehen zum Beispiel Fehler bei der Ausrichtung der Zuschnitte. Die Entwicklung und Inbetriebnahme einer automatischen Zuführeinrichtung für Kartonzuschnitte, kann die Qualität der inline gewonnenen Daten verbessern. Für den künftigen industriellen Betrieb ist ein Modul denkbar, das die Ausrichtung selbstständig herstellt oder aber die Zuschnitte direkt aus einer Kartonbahn heraustrennt.
- In **Abschnitt 7.2.4** wurde darauf hingewiesen, dass die durch den Rückstellwinkel resultierende Abweichung des Ziehteilradius vernachlässigt wurde. Durch die Entwicklung

und Implementierung eines Algorithmus zur automatischen Messung des Rückstellwinkels, könnte die Korrektur der Messdaten verbessert werden. Es bleibt zu untersuchen, inwiefern diese Messungen an den inline gewonnenen Bilddaten durchgeführt werden können.

- Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit für die Auswertung Industriekameras zu verwendet. Hierbei sollte in erster Linie auf eine hohe Auflösung des Kameramodells und das Vorhandensein einer geeigneten API geachtet werden. Die Programmierschnittstelle sollte den Zugriff auf die Fokussierung, Auflösung sowie Helligkeit und Sättigung gestatten. Insbesondere die Einstellung der Fokusebenenlage kann einen deutlichen Zeitvorteil bedeuten, da bei den derzeit eingesetzten Modellen auf den Autofokus zurückgegriffen werden muss, dessen Einstellung bei der Messung vergleichsweise viel Zeit in Anspruch nimmt.
- Kreuzkorrelationsmethoden zur Mustererkennung sind auf die Verwendung von Modellen angewiesen. Diese sind prinzipbedingt fehlerbehaftet. Daher eröffnet sich ein Optimierungsansatz bezüglich des Faltenmodells. Durch Variation der Breite des Grauwertverlaufs sowie der Modellgröße könnte ein Faltenmodell gefunden werden, das optimierte Analyseergebnisse liefert. Weiterhin ist eine Überlagerung von Bildausschnitten frequenzgefilterter Zargenbilder zur Optimierung des Faltenmodells denkbar.
- Ferner können weitere Untersuchungen zeigen, inwiefern der Einsatz mehrerer unterschiedlicher Faltenmodelle zu einem höheren Informationsgewinn führt. Auf diese Weise könnte beispielsweise die Faltenbreite klassifiziert werden. Ein weiterer Ansatzpunkt beim Einsatz unterschiedlicher Faltenmodelle eröffnet sich bei konkaven Ziehteilen (vgl. **Abschnitt 9.2**). Sehr schräge oder gar horizontale Falten können bisher nicht sicher erkannt werden. Künftige Studien können somit die diesbezügliche Auswertungsoptimierung zum Gegenstand haben.
- Eine Implementierung der Kreuzkorrelationsfunktion wird in der Literatur als sehr aufwändig bezüglich der Rechenzeit beschrieben. Zwar übertreffen die erreichten Rechenzeiten pro Bildzeile bei Weitem die gesetzten Ziele, jedoch wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass bei einer mehrzeiligen Auswertung ggf. keine ausreichende Rechenzeit erzielt werden kann. Durch verschiedene Optimierungsverfahren lassen sich die Kreuzkorrelationsmethoden jedoch verbessern [56]. Weitere Optimierungsansätze sind die Anpassung der verwendeten Datenstrukturen sowie die algorithmische Optimierung [57]. Ferner ist die verwendete Programmiersprache Python eine interpretierte Sprache. Durch

die Implementierung in eine maschinennahe, kompilierbare Sprache wie C/C++ lässt sich die Rechenzeit weiter verbessern.

- Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden nur ausgewählte Parameter betrachtet. Durch die Realisierung der Anbindung des OPC-Servers kann automatisiert auf alle Steuerungsparameter des Versuchsstandes ohne weiteren Aufwand zugegriffen werden. Diese Daten können in der Datenbank leicht mit den Analyseergebnissen verknüpft werden. Auf diese Weise könnten Erkenntnisse über den Ziehprozess gewonnen werden, die durch den hohen Aufwand bei manueller Datenaufzeichnung bisher nicht möglich waren. Ferner ließe sich das Messsystem anhand von SPS-Daten, wie der Stempelposition, triggern und so weiter automatisieren.
- Die verwendeten Kameras verfügen über Mikrofone und somit über weitere Sensoren. Durch eine Frequenzanalyse der Versuchsstandgeräusche ist die Vorhersage von Prozessabweichungen oder Ausfällen denkbar, die sich bisher nicht durch die Einstell- und Zielgrößen realisieren lässt. Dadurch lässt sich beispielsweise ein Condition Monitoring des Versuchsstandes erreichen.
- Durch die Inline-Messung und die Verknüpfung der Messungen mit Einstellparametern fällt im Dauerbetrieb ein sehr umfangreicher Datenbestand an. Weiterführende Studien sollten die Auswertung dieses historischen Datenbestandes im Bezug zu aktuellen Datensätzen zum Gegenstand haben. So könnten durch die Entwicklung intelligenter Assistenzsysteme Aussagen zu Trendanalysen, Vorhersagen über die zu erwartenden Ziehteilqualität oder Maschinenstörungen getroffen werden. Möglicherweise lässt sich durch eine derartige Analyse auch ein Werkzeugverschleiß bzw. eine Werkzeugbeschädigung nachweisen.

Durch das entwickelte Inline-Faltenauswertungsmodul wird die Möglichkeit geboten, durch geeignete Datenanalyse ein tiefgreifenderes Verständnis über den Ziehprozess zu gewinnen. Zudem entsteht eine Vielzahl von weiteren Untersuchungspunkten, deren Erforschung eine noch zuverlässigere Faltenauswertung verspricht und diverse Restriktionen bezüglich der Randbedingungen aufhebt.

Ferner bildet das Inline-Faltenauswertungsmodul den Grundstein für weitere zukunftsfähige Entwicklungen, die im Rahmen von Industrie 4.0 stattfinden. Beispielhaft seien an dieser Stelle intelligente Assistenzsysteme genannt, die sich durch eine Kopplung des in [31] entwickelten Systems mit dem Inline-Faltenauswertungsmodul realisieren lassen könnten.

12 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und Inbetriebnahme eines Auswertungsmoduls zur Inline-Messung der Faltenverteilung tiefgezogener Kartonformteile. Die Zuverlässigkeit des Messsystems ist hierbei von besonderer Bedeutung für die technische Umsetzung. Mit Hilfe von Versuchen waren die Messungen anhand der Daten einer Referenzmessmethode zu validieren. Auf einer abschließenden Analyse aufbauend, waren Verbesserungsvorschläge für das Inline-Faltenauswertungsmodul zu entwickeln.

Basierend auf einer ausführlichen Recherche zu Methoden der Faltenauswertung an Kartonformteilen wurden diverse Lösungsvarianten erstellt. Durch die Bewertung verschiedener Kriterien wurde eine Vorzugsvariante ausgewählt, konstruiert und in Betrieb genommen. Mit der Programmiersprache Python wurde ein Softwaresystem entwickelt, das die Steuerung des Messsystems realisiert.

Durch eine Schwachstellenanalyse der bisherigen Bildverarbeitungsmethoden zur Untersuchung der Faltenverteilung konnte ein Algorithmus entwickelt und implementiert werden, der in der Lage ist durch die Beachtung der ebenen Faltenausdehnung sehr zuverlässig Falten zu detektieren. Des Weiteren konnte eine Funktion hergeleitet und validiert werden, die die projektive Abweichung der Zargenbilder kompensiert. Ferner wurde eine Datenbankanwendung zur Ergebnisspeicherung weiterentwickelt. Die Verknüpfung von Einstellparametern und Zielgrößen durch den Einsatz eines OPC-Servers konnte praktisch nachgewiesen, jedoch nicht vollständig umgesetzt werden.

Nach umfangreichen Versuchen konnte mittels statistischer Tests nachgewiesen werden, dass das neu entwickelte Verfahren zur Lasertriangulation gleichwertige Ergebnisse bezüglich Faltenanzahl und –verteilung liefern kann. Ansatzweise konnte gezeigt werden, dass das Verfahren auch für andere Ziehteilformate und –beschaffenheiten geeignet ist, jedoch auch Grenzen bei sehr feinverteilten Falten aufweist.

Die vorgeschlagenen Verbesserungsvorschläge stellen Ansätze dar, um diese Grenzen in Richtung qualitativ hochwertiger Kartonformteile zu erweitern. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Entwicklung und Versuchsdurchführung konnten weitere Verbesserungsansätze sowie Ansatzpunkte für weiterführende Studien geschlussfolgert werden.

Martin Meyer

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich mit meiner Unterschrift, dass ich die von mir am heutigen Tag eingereichte Diplomarbeit zum Thema:

Entwicklung und Umsetzung eines Moduls zur Inline-Faltenauswertung an Kartonziehteilen

vollkommen selbstständig und nur unter Verwendung der in der Arbeit angegebenen Literatur und Abstimmungspartner angefertigt habe.

Martin Meyer

Dresden, den 15. Oktober 2015

Thesen

1. Durch die Inline-Faltenauswertung an tiefgezogenen Kartonformteilen lassen sich im Prozess zuverlässig und zerstörungsfrei Qualitätskennwerte an Ziehteilen bestimmen.
2. Die in situ Messung der Faltenverteilung kann Mess- und Analysezeiten erreichen, die potentiell auch industriellen Maßstäben genügen, und kann somit die Grundlage für eine Prozessregelung darstellen.
3. Die Anwendung der zweidimensionalen Fouriersynthese erlaubt einen Ausgleich der graduellen Belichtung und ermöglicht durch einen erhöhten Kontrast die Segmentierung von Falten und Hintergrund.
4. Infolge der Berechnung eines Ähnlichkeitsmaßes durch Kreuzkorrelation zwischen Bildausschnitten und einem Faltenmodell lassen sich Falten pixelgenau lokalisieren.
5. Durch die Beachtung der ebenen Faltenausdehnung ist der neu entwickelte Analysealgorithmus bisherigen Methoden qualitativ überlegen.
6. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Analysealgorithmus ist robust gegenüber Bilderfehlern, Fehlstellen und Rauschen.
7. Die hergeleitete Korrekturfunktion kann durch den Ausgleich der Zargenrundung die photogrammetrische Messung der Faltenposition ermöglichen.
8. Mit Hilfe des Inline-Faltenauswertungsmoduls lassen sich im Vergleich zur Lasertriangulation mindestens gleichwertige Messungen der Faltenverteilung erzielen, jedoch zeichnet sich die Inline-Messung, insbesondere gegenüber bisherigen Methoden der Bildgewinnung, durch einen deutlich geringeren Zeitaufwand und einen höheren Automatisierungsgrad aus.
9. Unter der Anwendung des Analysealgorithmus lassen sich auch in Ziehteilen abweichender Geometrie und Farbe sowie unterschiedlichen Materialien Falten lokalisieren.

Martin Meyer

Literaturverzeichnis

- [1] DESTATIS STATISTISCHES BUNDESAMT: *Eingesammelte gebrauchte Transport- und Umverpackungen 2013*. URL https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Tabellen/TabellenTUV_gewerblich_industriell.html – Überprüfungsdatum 2015-10-14
- [2] VERBAND DEUTSCHER PAPIERFABRIKEN E.V.: *Entwicklung der Papierproduktion nach Sorten seit 2007*. URL <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/5940/umfrage/entwicklung-der-papierproduktion-nach-sorten-seit-2007/> – Überprüfungsdatum 2015-10-06
- [3] FACIT MARKETING-FORSCHUNG: *Die neue Macht am POS : Das Image und die Leistungsfähigkeit von Verpackungen: Die neue Macht am POS : Das Image und die Leistungsfähigkeit von Verpackungen*. 2004
- [4] BLEISCH, Günter ; MAJSCHAK, Jens-Peter ; WEISS, Uta: *Verpackungstechnische Prozesse : Lebensmittel-, Pharma- und Chemieindustrie*. 1. Aufl. Hamburg : Behr, 2011 (Theorie und Praxis)
- [5] HAUPTMANN, Marek: *Die gezielte Prozessführung und Möglichkeiten zur Prozessüberwachung beim mehrdimensionalen Umformen von Karton durch Ziehen*. Dresden, TU Dresden, Professur Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik. Dissertation
- [6] BANTHIEN, Henning: *Plattform Industrie 4.0*. URL <http://www.plattform-i40.de>
- [7] BOTTHOF, Alfons: *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. HARTMANN, Ernst Andreas (Hrsg.). Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2015
- [8] *Taschenbuch der Papiertechnik : Mit 94 Tabellen*. 2., aktualisierte Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, 2013
- [9] TSCHÄTSCH, Heinz ; DIETRICH, Jochen: *Praxis der Umformtechnik : Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*. 10., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010 (OnlinePlus)
- [10] ULRICH WIEDUWILT: *Anordnung zum Tiefziehen von Papier, Karton oder Pappe*. Robert Bosch GmbH. 14.08.2013. Veröffentlichungsnr. DE102012201882 A1
- [11] MÜLLER, Tobias: *Konsultation* (2015-07-08)
- [12] LENSKE, Alexander: *Entwicklung und Konstruktion einer Vorrichtung zum Prüfen der Formstabilität von Kartonformteilen*. Dresden, TU Dresden. Diplomarbeit. 2009

- [13] OEHME, Friedrich ; JOLA, Martin: *Betriebsmesstechnik unter Einsatz von in-line und on-line Analysatoren*. Heidelberg : Hüthig, op. 1982
- [14] SCHIESSLE, Edmund: *Industriesensorik : Automation, Messtechnik und Mechatronik*. 1. Aufl. Würzburg : Vogel Industrie Medien, 2008
- [15] MÜLLER, Tobias: *Entwicklung eines Analysealgorithmus zur Erfassung der Faltenverteilung tiefgezogener Kartonformteile mittels Laserabstandsmessung*. Dresden, TU Dresden, Professur Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik. Diplomarbeit. 2012-09-27
- [16] TRÄNKLER, Hans-Rolf ; REINDL, Leonhard M.: *Sensortechnik : Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. 2., völlig neu bearbeitete Auflage
- [17] WITT, Tilman: *Entwicklung eines Analysealgorithmus zur Erfassung der Materialverteilung tiefgezogener Kartonformteile mittels konfokaler Abstandssensoren*. Dresden, TU Dresden, Professur Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik. Diplomarbeit. 2013-12-01
- [18] DEMANT, Christian ; SPRINGHOFF, Axel ; STREICHER-ABEL, Bernd: *Industrielle Bildverarbeitung : Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*. 3., aktualisierte Aufl. Heidelberg [u.a.] : Springer, 2011
- [19] LUHMANN, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie : Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 2., überarb. Aufl. Heidelberg : Wichmann, 2003
- [20] JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung : Und Bildgewinnung*. 7., neu bearb. Aufl. Berlin u.a. : Springer Vieweg, 2012
- [21] KERLIKOWSKY, Christian: *Entwicklung und Erprobung eines Algorithmus zur Inline-Faltenauswertung an tiefgezogenen Kartonproben*. Dresden, TU Dresden, Professur Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik. Diplomarbeit. 2014-11-28
- [22] WALLMEIER, Malte ; HAUPTMANN, Marek ; MAJSCHAK, Jens-Peter: *New Methods for Quality Analysis of Deep-Drawn Packaging Components from Paperboard*. In: *Packaging Technology and Science* (2015), Nr. 28, S. 91–100
- [23] LENSKE, Alexander: Gesprächsunterlagen vom 28.05.2015
- [24] BECHTLOFF, Jürgen: *Messtechnik*. 1., Auflage. Würzburg : Vogel Business Media, 2011
- [25] KIENCKE, Uwe ; JÄKEL, Holger: *Signale und Systeme*. 4., korrigierte Aufl. München : Oldenbourg, 2008

- [26] GÖHLER, Horst: *Fehler- und Ausgleichsrechnung : Statistische Fehleranalyse*. 1. Aufl. Dresden : Ingenieurschule für Geodäsie und Kartographie, 1981
- [27] RUNKLER, Thomas A.: *Data-Mining : Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse ; mit 7 Tabellen*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010
- [28] DIN 45667. Oktober 1969. *Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen*
- [29] KOHLER, Michael: *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Berlin : Springer, 2012
- [30] MICROSOFT: *LifeCam Studio*. URL <https://www.microsoft.com/hardware/de-de/p/lifecam-studio#support> – Überprüfungsdatum 2015-07-18
- [31] MEYER, Martin: *Entwicklung eines intelligenten, selbstoptimierenden Verarbeitungssystems zum Tiefziehen von Karton*. Dresden, TU Dresden, Professur Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik. Großer Beleg. 2015-03-30
- [32] HARTLEY, Richard ; ZISSERMAN, Andrew: *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge : Cambridge University Press, 2003 [reimpr. 2008]
- [33] GRUEN, Armin ; HUANG, Thomas S.: *Calibration and orientation of cameras in computer vision : With 25 tables*. Berlin [u.a.] : Springer, 2001 (34)
- [34] BRADSKI, Gary R. ; KAEHLER, Adrian: *Learning OpenCV : Computer vision with the OpenCV library*. 1st ed. Sebastopol, CA : O'Reilly, 2008
- [35] HOWSE, Joseph: *OpenCV Computer Vision with Python* : Packt Publishing, 2013
- [36] DIN 6164. Februar 1980. *DIN - Farbenkarte, System der DIN -Farbenkarte für den 2° - Normalbetrachter*
- [37] BÜTTNER, Stefan: Gesprächsunterlagen vom 09.07.2015
- [38] BROWN, Allan: *OPC : Der Weg zur globalen Interoperabilität ; volume D/E*. 1. Aufl. Würzburg : Vogel, 2004
- [39] BARELMANN, Dieter: *OPC in der Praxis*. Berlin, Offenbach : VDE-Verl., 1999 (Bd. 4)
- [40] RUSS, John C.: *The image processing handbook*. 5th ed. Boca Raton : CRC/Taylor and Francis, 2007
- [41] SCHÖNHAMMER, Rainer: *Einführung in die Wahrnehmungspsychologie : Sinne, Körper, Bewegung*. 1. Aufl. Wien : Facultas, 2009 (3142)

- [42] NISCHWITZ, Alfred: *Computergrafik und Bildverarbeitung : Band II: Bildverarbeitung*. 3., neu bearb. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011 (/ Alfred Nischwitz ... ; Bd. 2)
- [43] GIESSEL, Andrew: *simple numpy based 2d gaussian function*. URL <https://gist.github.com/andrewgiessel/4635563>
- [44] SÜSSE, Herbert ; RODNER, Erik: *Bildverarbeitung und Objekterkennung : Computer Vision in Industrie und Medizin*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- [45] LANARO, Gabriele: *Python High Performance Programming* : Packt Publishing, 2013
- [46] VOGEL-HEUSER, Birgit: *Agenten im Umfeld von Industrie 4.0 : [6. Expertenforum "Agenten im Umfeld von Industrie 4.0" 07./08. Mai 2014]*. 1. Aufl. Göttingen : Sierke-Verl., 2014 (4)
- [47] ERTEL, Wolfgang: *Grundkurs Künstliche Intelligenz : Eine praxisorientierte Einführung*. 3. Aufl. 2013. Wiesbaden : Imprint: Springer Vieweg, 2013
- [48] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *Zukunftsbild Industrie 4.0*. URL <http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/zukunftsbild-industrie-4-0.html> – Überprüfungsdatum 2015-10-07
- [49] DIN EN ISO 9000. August 2014. *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*
- [50] *IEEE standard glossary of software engineering terminology*. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1990
- [51] HUBER, Ludwig: *Validierung computergesteuerter Analysensysteme : Ein Leitfaden für Praktiker*. Berlin, New York : Springer, 1996
- [52] KLEPPMANN, Wilhelm: *Taschenbuch Versuchsplanung : Produkte und Prozesse optimieren*. 4., überarb. Aufl. München [u.a.] : Hanser, 2006 (Praxisreihe Qualitätswissen)
- [53] KÜHLMAYER, M.: *Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure : Mit Praxisbeispielen*. Berlin : Springer, 2001 (VDI-Buch)
- [54] DIN EN ISO 139. Oktober 2011. *Textilien - Normklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung*
- [55] HAUPTMANN, Marek ; EHLERT, Sebastian ; MAJSCHAK, Jens-Peter: *The Effect of Concave Base Shape Elements on the Three Dimensional Forming Process of Advanced Paperboard Structures*. In: *Packaging Technology and Science* 27 (2014), S. 975–986
- [56] MASCHOTTA, Ralph: *Merkmalslistenbasierte Kreuzkorrelationsmethoden für die medizinische Bildverarbeitung*. Ilmenau, TU Ilmenau. Dissertation. 2008

- [57] HÄBERLEIN, Tobias: *Praktische Algorithmik mit Python*. München : Oldenbourg, R, 2012
- [58] FORBRIG, Peter: *Objektorientierte Softwareentwicklung mit UML : Mit 72 Beispielen und Aufgaben*. 3., völlig neu bearb. und erw. Aufl. München : Hanser, 2007
- [59] WEIßGERBER, Wilfried: *Elektrotechnik für Ingenieure : Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium*. 8., überarb. Aufl. Braunschweig [u.a.] : Vieweg, 2009

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des Ziehprozesses von Karton nach [5]	2
Abbildung 2.2: Materialüberschuss im Zuschnitt beim Ziehen [9]	3
Abbildung 2.3: Objektabbildung auf die Grauwertmatrix.....	9
Abbildung 2.4: Vergleich der Richtung der Bildgewinnung, a) Zarge, b) Schnittkante	10
Abbildung 2.5: Prinzip der Fouriersynthese, Links: Ausgangssignal, Mitte: Eliminierung der Störfrequenz im Frequenzraum, Rechts: rücktransformiertes Signal.....	13
Abbildung 2.6: Fenstereffekt bei der Fouriertransformation	15
Abbildung 2.7: Typen radialer Verzeichnung nach [19, S. 97]	15
Abbildung 2.8: Klassierverfahren zur Zählung signifikanter Signalspitzen.....	17
Abbildung 5.1: Funktionsmodell des Inline-Faltenauswertungsmoduls.....	22
Abbildung 6.1: Varianten der räumlichen Anordnung von Kameras	32
Abbildung 6.2: Schattenwurf an Falten, schematisch.....	33
Abbildung 6.3: Geeignete Beleuchtungskonfiguration	34
Abbildung 6.4: Gestellfunktionen	35
Abbildung 6.5: Eingebaute Gestellvariante.....	35
Abbildung 6.6: Verzeichnungskennfeld der Kameras	37
Abbildung 7.1: Grafische Benutzeroberfläche	40
Abbildung 7.2: Ebene Schwingungen und deren Frequenzspektren	43
Abbildung 7.3: Zweidimensionale Gaußkurve als Fensterfunktion zur Frequenzfilterung nach [43]	44
Abbildung 7.4: Beleuchtungsausgleich durch zweidimensionale Fouriersynthese	44
Abbildung 7.5: Bildung des Ausschnitts S aus der Grauwertmatrix G	45
Abbildung 7.6: Ergebnis der Kreuzkorrelationsfunktion an charakteristischen Beispielen	46
Abbildung 7.7: Ergebnis der Mustersuche durch Kreuzkorrelation.....	47

Abbildung 7.8: Projektion eines Zargenpunktes und daraus resultierender Fehler	48
Abbildung 7.9: Gesamtsystem des Inline-Faltenauswertungsmoduls	50
Abbildung 8.1: Äquidistante Markierungen auf dem Stempel zur Validierung der Korrekturfunktion	53
Abbildung 8.2: Auswirkung der Positionskorrektur	54
Abbildung 8.3: Qualitativer Verlauf der Faltendichte	58
Abbildung 9.1: Faltererkennung an Ziehteilen mit farblich veränderter Oberfläche	61
Abbildung 9.2: Faltererkennung an einem Ziehteil aus Ziehpappe.....	62
Abbildung A.1: Versuchsstand	ii
Abbildung E.1: Datenblatt Microsoft LifeCam Studio	ix
Abbildung F.1: Datenblatt LED Lichtstreifen	x
Abbildung G.1: Maße für Hüllsystem	xi
Abbildung H.1: Testfeld für die Kamerakalibrierung.....	xii
Abbildung I.1: Datenmodell der verwendeten Datenbankanwendung	xiii
Abbildung J.1: Kennfeld zur Ermittlung einer geeigneten Templateform	xiv
Abbildung K.1: Klassendiagramm des Softwaresystems.....	xvi
Abbildung K.2: Sequenzdiagramm des Mess- und Analyseablaufs.....	xvii
Abbildung O.1: Vergleich der scheinbaren und korrigierten Markierungsposition.....	xxvii
Abbildung O.2: Sensitivität der Korrekturfunktion bzgl. Ziehteilradius und Kameraabstand.....	xxvii
Abbildung P.1: Umgebungsklima während der Versuchsdurchführung.....	xxviii
Abbildung R.1: Schaltungsentwurf zur Beleuchtungssteuerung.....	xxxiii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Signalarten.....	11
Tabelle 2.2: Klassifikation von Testergebnissen.....	12
Tabelle 5.1: Vergleich verschiedener Messmethoden bezüglich ihrer Eignung für die Inline-Messung	24
Tabelle 5.2: Morphologischer Kasten der Prinziplösungen	26
Tabelle 5.3: Gewichteter Variantenvergleich.....	29
Tabelle 7.1: Klassifikation des Analyseverfahrens	47
Tabelle 8.1: Parameterstufen des Versuchsplans	55
Tabelle 10.1: Kostengegenüberstellung der Lösungsvarianten	64
Tabelle A.1: Technische Daten des Auswertungslaptops	iii
Tabelle B.1: Anforderungsliste	iv
Tabelle C.1: Bedeutung der Bewertungsunterteilung	vi
Tabelle D.1: Gegenüberstellung der untersuchten Kameramodelle	viii
Tabelle O.1: Messwerte zur Positionskorrektur in MD.....	xxv
Tabelle O.2: Messwerte zur Positionskorrektur in CD	xxvi
Tabelle Q.1: Ergebnisse des t-Tests der Mittelwertabweichungen	xxx
Tabelle Q.2: Einstellungen am Versuchsstand	xxxi
Tabelle R.1: Bauelemente der Beleuchtungssteuerung.....	xxxiv

Anlagenverzeichnis

A.	Beschreibung des Versuchsstandes	ii
B.	Anforderungsliste.....	iv
C.	Bewertungssystem des gewichteten Variantenvergleichs	vi
D.	Untersuchte Kameramodelle	viii
E.	Datenblatt der Microsoft LifeCam Studio	ix
F.	Datenblatt der LED Lichtstreifen	x
G.	Maße der Verdunklungselemente.....	xi
H.	Testfeld für Kalibrierung und Erläuterung der Hough-Transformation	xii
I.	Datenbankentwurf	xiii
J.	Auswahl einer geeigneten Templategröße und der Breite des Faltenmodells	xiv
K.	UML-Klassen- und Sequenzdiagramm des Softwaresystems	xvi
L.	Wichtige Teile des Quellcodes	xviii
M.	Externe Python-Bibliotheken	xxii
N.	Anmerkungen zur Inbetriebnahme des Auswertungsmoduls	xxiv
O.	Messdaten zur Validierung der Korrekturfunktion.....	xxv
P.	Schwankung des Umgebungsklimas	xxviii
Q.	Messergebnisse der Validierung	xxix
R.	Anmerkungen zur Beleuchtungssteuerung	xxxii

Anlagen

A. Beschreibung des Versuchsstandes



Abbildung A.1: Versuchsstand

Alle in dieser Arbeit durchgeführten Versuche sind mit dem in **Abbildung A.1** dargestellten Versuchsstand realisiert worden. Durch eine Markierung an der Ziehbuchse und an allen Kartonzuschnitten wurde die Ausrichtung dieser umgesetzt. Die Temperaturen des Stempels sowie der Ziehbuchse wurden gemäß den Parameterniveaus eingestellt. Die Faltenhalterkraft wurde auf das entsprechende Parameterniveau eingestellt und während des Ziehprozesses linear auf 500 N abgesenkt. Die Versuche wurden ohne Gegenhalter, Kalibrierbuchse und Auswerfer durchgeführt.

Prozessvarianten

Bei der geschlossenen Prozessvariante ist das Verfahren mit einem Gesenk ausgeführt, in das das Ziehteil geformt wird. Ferner wird das umgeformte Ziehteil entgegen der Vorschubrichtung ausgestoßen. Die offene Prozessvariante zeichnet sich dadurch aus, dass der Stempel durch die Ziehbuchse hindurchfährt. Diese Prozessvariante wird bei den Versuchen im Kontext dieser Arbeit angewendet. Nach der Umformung wird das fertige Ziehteil an der Unterseite der Ziehbuchse abgestreift, indem der Stempel nach dem Ziehvorgang entgegen der Umformrichtung verfahren wird.

Technische Daten des Messrechners

Sowohl die Steuerung der Kameras als auch die Auswertung wurden nicht durch den Steuerungs-PC vorgenommen, sondern durch einen separaten Laptop. Zur Interpretation der Rechenzeiten sind nachfolgend in die technischen Eckdaten dieses Laptops aufgeführt.

Tabelle A.1: Technische Daten des Auswertungslaptops

Prozessor	Intel® Core™ i7-2670QM @2.20 GHz
Arbeitsspeicher	8.00 GB
System-Typ	64-Bit-Betriebssystem, x64-basierter Prozessor
Betriebssystem	Windows 8.1 Pro
Entwicklungsumgebung	Visual Studio 2015 mit Python-tools for Visual Studio
Python-Version	2.7

B. Anforderungsliste

Tabelle B.1: Anforderungsliste

Kategorie	Nummer	F/W	Beschreibung
Geometrie	1.1	F	runde Messobjekte (Kartonziehteile)
	1.2	F	mindestens für einen Objektdurchmesser geeignet ($d = 110 \text{ mm}$)
	1.3	W	erweiterbarer Formatbereich
Kinematik	2.1	W	möglichst keine beweglichen Teile
Kräfte	3.1	F	geringe Vibrationen des Versuchsstandes
	3.2	W	Keine direkt einwirkenden Prozesskräfte
Energie	4.1	W	ohne externe Energieversorgung der Messeinrichtung
	4.2	W	230 V Stromversorgung für Rechentechnik
	4.3	W	energiesparende LED-Beleuchtung
Stoff	5.1	F	Kartonziehteile
	5.2	F	resistent gegen Kartonfasern/-stücke auf den Oberflächen
	5.3	F	Ausgerichteter Zuschnitt
	5.4	F	trockene Umgebung/Kartonziehteile
Signal	6.1	W	automatisches Startsignal
	6.2	W	Signalerfassung an höchstens zwei Messstellen (MD/CD)
	6.3	W	extern triggerbar (Messtechnik)
	6.4	F	Übertragung des Messsignals an einen Computer
	6.5	F	Erfassung, Übertragung und Verarbeitung in ca. 5 Sekunden
	6.6	W	Speicherung des Messsignals in einer Datenbank
	6.7	W	Signal für Beleuchtung
	6.8	W	automatische Erfassung der Einstellparameter
Sicherheit	7.1	F	Schutz vor Berührung elektrischen Komponenten, min. IP 40
	7.2	F	Schutz der Messtechnik vor mech. und therm. Belastungen
Ergonomie	8.1	W	übersichtliche grafische Benutzeroberfläche
	8.2	W	Start der Messung durch einen Knopfdruck
Einkauf	9.1	W	keine Einschränkungen
Fertigung	10.1	W	vorzugsweise Blechbiegeteile
	10.2	W	Beschränkung auf einfache gefräste/gebohrte Aluminiumteile
Kontrolle	11.1	W	Möglichkeit für Testmessung
	11.2	W	Statusanzeige für Komponenten
Montage	12.1	W	kein Spezialwerkzeug für Montage notwendig
	12.2	F	Einbau in bestehenden Tiefziehversuchsstand
Transport	13.1		entfällt
Gebrauch	14.1	F	Einsatz am Tiefziehversuchsstand
	14.2	F	Einsatz im realen Betrieb des Tiefziehversuchsstandes
	14.3	W	dauerhafter Einsatz

B. Anforderungsliste

Instandhaltung	15.1	W	kein regelmäßiger Wartungsaufwand notwendig
	15.2	W	Gewährleistung der Zugänglichkeit für Inspektionen
	15.3	W	Gewährleistung eines einfachen Austauschs von Komponenten
Nachhaltigkeit	16.1	W	Verwendung von universeller Mess-/Rechentechnik
	16.2	W	RoHS-Konforme elektrische Komponenten/Leitungen etc.
Kosten	17.1	F	< 1000 €
Termin	18.1	F	15.10.2015 Abgabe DA

C. Bewertungssystem des gewichteten Variantenvergleichs

Bei der gewichteten Variantenbewertung wird jedes Teilkriterium durch eine ganzzahlige Note bewertet, deren allgemeine Bedeutung **Tabelle C.1** widerspiegelt.

Tabelle C.1: Bedeutung der Bewertungsunterteilung

1	2	3	4	5
mangelhaft	ausreichend	gut	sehr gut	ausgezeichnet

Die Bewertung der Lösungsvarianten wird anhand verschiedener Kriterien vorgenommen, die den Entwicklungsaufwand, die Qualität der Messung sowie ökonomische Faktoren berücksichtigen. Nachfolgende Kriterien wurden zur Bewertung herangezogen:

- **konstruktiver Aufwand:** bewertet die Komplexität der entstehenden Baugruppe, Teileanzahl und fertigungstechnische Gesichtspunkte
- **Softwareentwicklung:** betrachtet den Aufwand für Schnittstellenkommunikation, Datenauswertung, Steuerung und ggf. Regelung der Komponenten
- **Platzbedarf:** berücksichtigt die Platzverhältnisse im Versuchsstand
- **Kosten:** ökonomische Faktoren der Komponenten- und Fertigungskosten
- **Messdauer:** bewertet die Mess- und Analysezeit einer Lösung
- **Systemkomplexität:** bewertet die Abhängigkeiten zwischen Hardware, Software und Steuerung innerhalb der Baugruppe; Systeme hoher Komplexität weisen häufig eine Anfälligkeit für unerwartete Fehler auf, die während der Entwicklung nicht oder nur schwer abschätzbar sind
- **Zuverlässigkeit:** schätzt sowohl die Robustheit der Sensoren als auch die Qualität der Ergebnisse ab
- **Flexibilität:** Obwohl vorerst nur eine Ziehteilgeometrie betrachtet wird, ist ein Verfahren, das auf verschiedene Ziehteilgrößen und -geometrien anpassbar ist, wünschenswert. Dies wird durch das Flexibilitätskriterium beachtet.

Begründung der Verteilung der Wichtungen

Messdauer und Zuverlässigkeit werden mit dem höchsten Gewicht gewertet, nicht zuletzt, da die Aufgabenstellung hohe Anforderungen an diese Kriterien stellt. Auch die Systemkomplexität geht mit hoher Wichtung ein, da bei hochkomplexen Systemen schnell Fehler auftreten können, die während der Planung nicht erwartet werden können, was insbesondere Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit im Einsatz und die Wartung hat.

Zwar dürfen die Entwicklungs- und Fertigungskosten den gesetzten Kostenrahmen nicht übersteigen, jedoch wird dieser als ausreichend hoch eingeschätzt. Hohe Flexibilität ist im Rahmen dieser Arbeit lediglich wünschenswert, jedoch keine feste Forderung. Aus diesen Gründen gehen die Kosten und Flexibilität mit einer mittleren Wichtung in die Bewertung ein.

Der Entwicklungsaufwand für Hard- und Software nimmt einen wesentlichen Anteil an der Bearbeitungszeit der vorliegenden Arbeit ein. Durch eine gute Planung und Zeitmanagement kann dieser Zeitanteil jedoch vergleichsweise leicht beherrscht werden, weshalb die Entwicklungskriterien nur gering gewichtet sind.

Ausgehend davon, dass eine technische Umsetzung nicht die ihr zugrunde liegenden Platzverhältnisse im Versuchsstand überschreitet, ist eine geringe Platzbeanspruchung nur von untergeordneter Bedeutung. Daher geht der Platzbedarf mit der geringsten Gewichtung in die Bewertung ein.

Erläuterung einzelner Teilbewertungen

Die geringe Teilbewertung des konfokalen Systems bezüglich der Entwicklungskriterien entsteht durch den notwendigen Ausgleich der Zargenabweichung von der Idealgeometrie. Somit werden zusätzliche Sensoren und eine Regelung der Sensorposition notwendig. Dies wirkt sich auch auf die Kosten sowie Systemkomplexität aus.

Die Kosten für das Lasertriangulationssystem sind durch die zu konstruierende Drehvorrichtung relativ hoch, es werden Motoren und passende Steuerungen benötigt. Somit wird das Kostenkriterium vergleichsweise niedrig bewertet.

Die Energieübertragung über eine rotierende Schnittstelle des Panoramaverfahrens und die rotierenden Teile wirken sich äußerst negativ auf dessen Entwicklungskriterien aus. Durch die Anbindung eines WLAN-Netzes steigt zudem die Systemkomplexität.

Das Schnittkantenverfahren weist Schwächen in der Zugänglichkeit der Schnittkante auf.

D. Untersuchte Kameramodelle

Die drei untersuchten Kameramodelle sind in **Tabelle D.1** gegenübergestellt.

Tabelle D.1: Gegenüberstellung der untersuchten Kameramodelle

	Raspberry Pi Kamera-Modul	MS LifeCam vx-2000	MS LifeCam Studio 1080p
max. Auflösung	1920 x 1080 Pixel	1280 x 720 Pixel	1920 x 1080 Pixel
min. Objektabstand	ca. 30 cm	ca. 20 cm	< 10 cm
subjektive Bildqualität	mäßig	gut	sehr gut
Preis	rund 30 €	rund 40 €	rund 55 €
Pro	<ul style="list-style-type: none"> - sehr kompakt - leichte Ansteuerung 	<ul style="list-style-type: none"> - kompakte Bauform - preisgünstig - klare Bilder 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Auflösung - sehr gute Eigenschaften im Nahbereich - klare Bilder - kompakte Bauform
Contra	<ul style="list-style-type: none"> - nur mit Raspberry Pi verwendbar - verrauschte Bilder - ggf. Gehäuse notwendig - Kabellänge, evtl. Verlängerungskabel nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Auflösung - mäßige Eigenschaften im Nahbereich 	<ul style="list-style-type: none"> - teuerstes Modell

E. Datenblatt der Microsoft LifeCam Studio

Microsoft®
LifeCam
Studio™



Version Information	
Product Name	Microsoft® LifeCam Studio™
Product Version	Microsoft LifeCam Studio
Webcam Version	Microsoft LifeCam Studio
Product Dimensions	
Webcam Length	4.48 inches (114 millimeters)
Webcam Width	2.36 inches (60.0 millimeters)
Webcam Depth/Height	1.77 inches (45.0 millimeters)
Webcam Weight	4.52 ounces (128 grams)
Webcam Cable Length	72.0 inches +6/-0 inches (1829 millimeters +152/-0 millimeters)
Compatibility and Localization	
Interface	Hi-speed USB compatible with the USB 2.0 specification
Operating Systems ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Windows™ 8.1, Windows 8, Windows RT 8.1, Windows RT 8, and Windows 7 • Macintosh OS X v10.7-10.9 • Android 3.2 and 4.2 <p>¹Advanced functionality not available with all devices and/or operating systems. See compatibility information at: www.microsoft.com/hardware/compatibility.</p>
Top-line System Requirements	<p>Requires a PC that meets the requirements for and has installed one of these operating systems:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Windows 8.1, Windows 8, or Windows 7 • VGA video calling: • Intel Dual-Core 1.6 GHz or higher • 1 GB of RAM • 720p HD recording: • Intel Dual-Core 3.0 GHz or higher • 2 GB of RAM • 1.5 GB hard drive space • Display adapter capable of 16-bit color depth or higher • 2 MB or higher video memory • Windows-compatible speakers or headphones • USB 2.0 <p>You must accept License Terms for software download. Please download the latest available software version for your OS/Hardware combination</p> <p>Internet access may be required for certain features. Local and/or long-distance telephone toll charges may apply.</p> <p>Software download required for full functionality of all features.</p> <p>Internet functions (post to Windows Live™ Spaces, send in e-mail, video calls), also require: Internet Explorer® 6/7 browser software required for installation; 25 MB hard drive space typically required (users can maintain other default Web browsers after installation)</p> <p>The Microsoft LifeCam Studio has basic Video & Audio Functionality with Windows Live Messenger, AOL® Instant Messenger™, Yahoo!® Messenger, Skype, and Microsoft Office Communicator</p>
Compatibility Logos	<ul style="list-style-type: none"> • Compatible with Microsoft Windows 8 and Windows RT • Hi-Speed USB Logo
Software Localization	Microsoft LifeCam software version 3.5 may be installed in Simplified Chinese, Traditional Chinese, English, French, German, Italian, Japanese, Korean, Brazilian Portuguese, Iberian Portuguese, or Spanish. If available, standard setup will install the software in the default OS language. Otherwise, the English language version will be installed.
Windows Live™ Integration Features	
Video Conversation Feature	Windows Live call button delivers one touch access to video conversation
Call Button Life	10,000 actuations
Webcam Controls & Effects	LifeCam Dashboard provides access to animated video special effect features and webcam controls
Windows Live Integration Features	<ul style="list-style-type: none"> • Windows Live Photo Gallery integration - Take a photo with LifeCam Software, then with one click open Photo Gallery to edit, tag and share it online • Windows Live Movie Maker integration - Record a video with LifeCam Software and start a movie project on Movie Maker with just one click to then upload it to your favorite networking site
Imaging Features	
Sensor	CMOS sensor technology
Resolution	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor Resolution: 1920 X 1080 • Still Image: 5 megapixel (2560 x 2048 pixel, interpolated) photos*
Field of View	75° diagonal field of view
Imaging Features	<ul style="list-style-type: none"> • Automatic face tracking** • Digital pan, digital tilt, and 3x digital zoom** • Auto focus from 0.1m to ≥ 10m • Automatic image adjustment with manual override • Up to 30 frames per second
Product Feature Performance	
Audio Features	Integrated omni-directional super wideband microphone
Frequency Response	100 Hz – 18 kHz
Mounting Features	<ul style="list-style-type: none"> • Desktop and CRT universal attachment base • Notebook and LCD universal attachment base • Tripod universal attachment base
Storage Temperature & Humidity	-40 °F (-40 °C) to 140 °F (60 °C) at <5% to 65% relative humidity (non-condensing)
Operating Temperature & Humidity	32° F (0° C) to 104° F (40° C) at <5% to 80% relative humidity (non-condensing)

Abbildung E.1: Datenblatt Microsoft LifeCam Studio

G. Maße der Verdunklungselemente

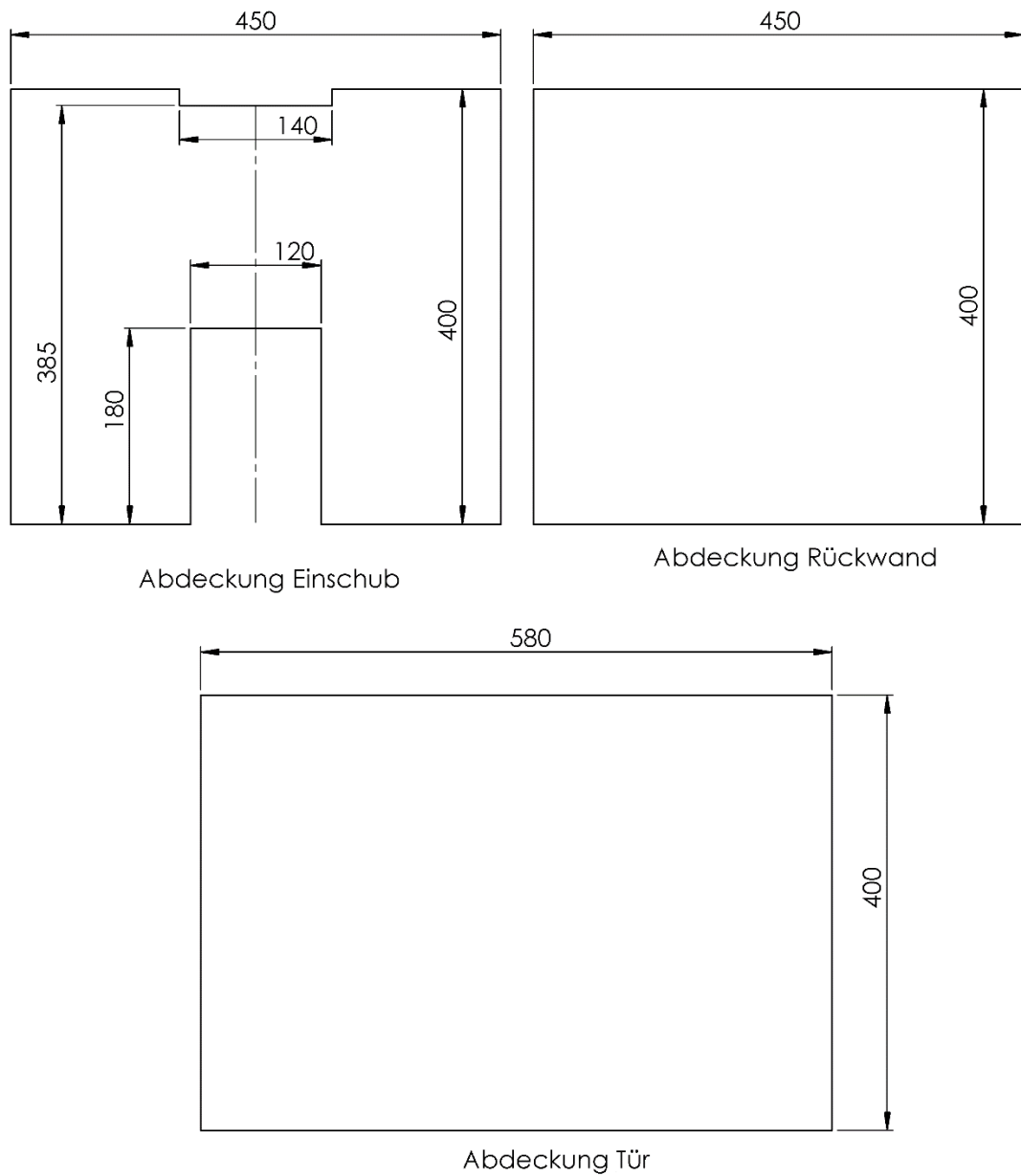


Abbildung G.1: Maße für Hüllsystem

H. Testfeld für Kalibrierung und Erläuterung der Hough-Transformation

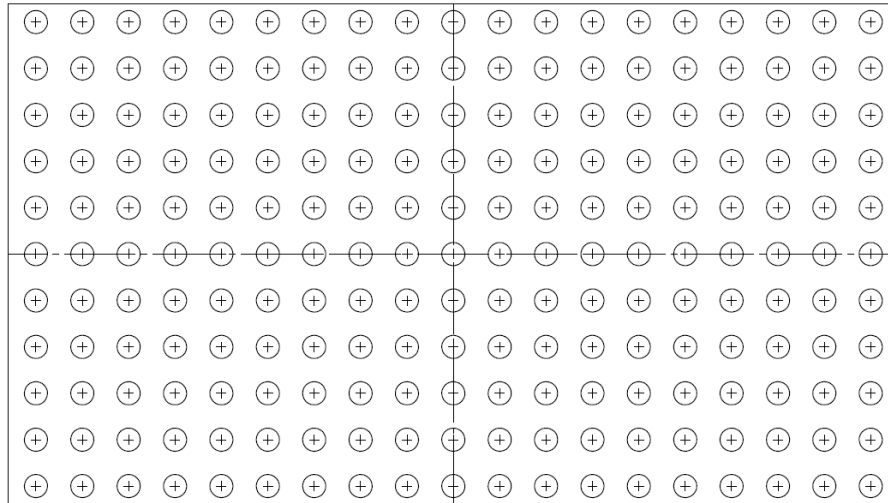


Abbildung H.1: Testfeld für die Kamerakalibrierung

Hough-Transformation

Die Hough-Transformation ermöglicht die Lokalisierung geometrischer Elemente in einem Bild, wenn diese in Parameterform darstellbar sind. Speziell für Kreise werden Kurven der Form

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (25)$$

betrachtet. Dafür muss der Radius r bekannt oder als Bereich durch a-priori-Wissen vorgegeben sein. Die Transformation in den Houghraum wird folgendermaßen durchgeführt. Der Houghraum wird durch die drei Parameter der obigen Gleichung aufgespannt. Durch ein Gradientenverfahren werden nun die Kanten in einem Bild berechnet. Für jeden Kantenpunkt werden alle Kreismittelpunkte (x_c, y_c) bestimmt²⁸, die bei bekanntem Radius r zu diesem Kantenpunkt führen können. Wird ein solcher Kreismittelpunkt gefunden, wird der Betrag im Houghraum an der Stelle (x_c, y_c, r) um eins erhöht. Dieses Verfahren wird für alle Kantenpunkte im Bild ausgeführt und die entsprechenden Beträge im Houghraum akkumuliert. Es kann nun gezeigt werden, dass sich durch die Akkumulation Häufungspunkte im Houghraum einstellen, die einen Kreis des Radius r repräsentieren, welcher seinen Mittelpunkt an den gleichen x-y-Koordinaten hat, wie der Häufungspunkt selbst [19, S. 388f].

²⁸ Alle möglichen Kreismittelpunkte liegen dabei auf einem Kreis des Radius r um den Kantenpunkt.

I. Datenbankentwurf

Der abgebildete Datenbankentwurf entstammt [31] und wurde in Microsoft Access 2013 implementiert und durch ein Frontend erweitert.

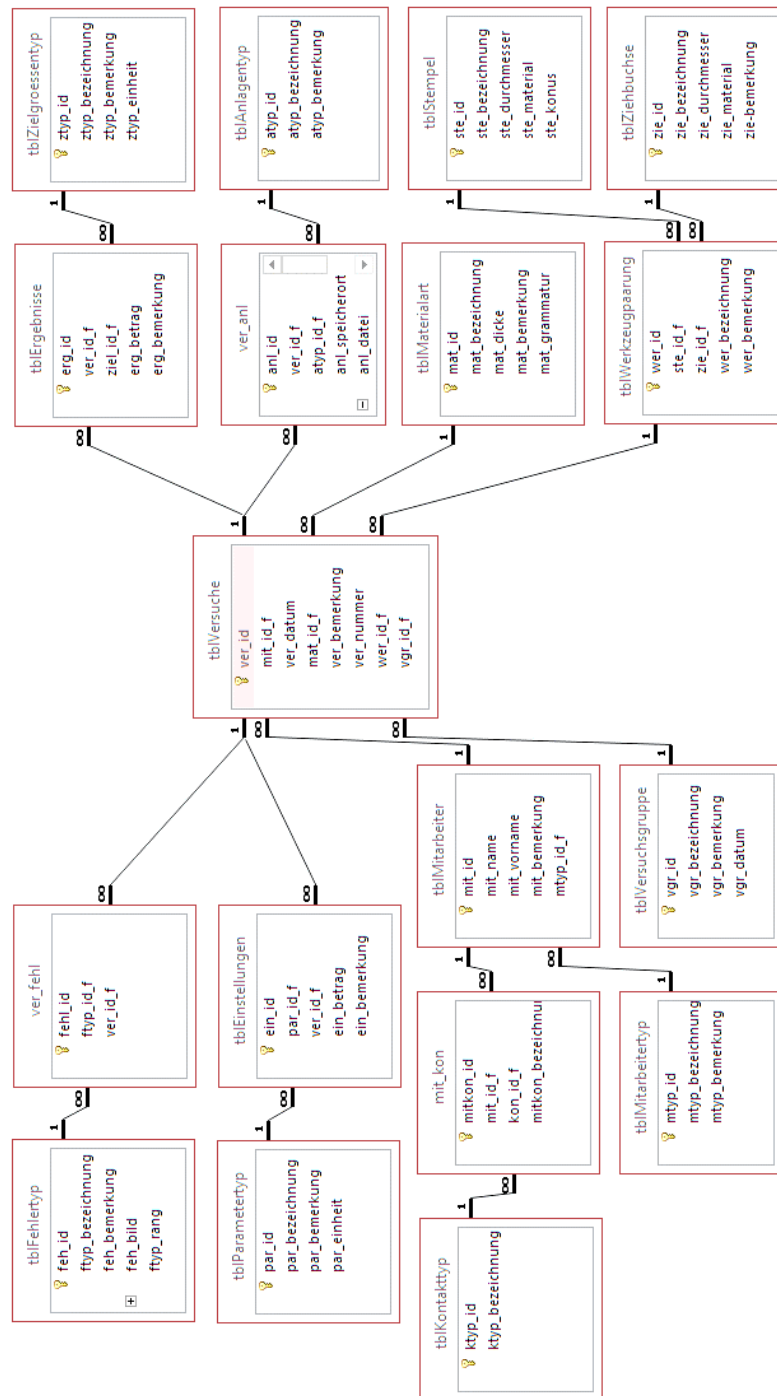


Abbildung I.1: Datenmodell der verwendeten Datenbankanwendung

J. Auswahl einer geeigneten Templategröße und der Breite des Faltenmodells

Wie bereits in **Abschnitt 7.2.3** erwähnt wird, wird das Faltenmodell gemäß einer Normalverteilung modelliert. Im Quellcode wird dies durch die Zeilen

```
template = np.zeros((size, size), dtype = 'float32')
template[:,] = np.exp(-width*np.log(2) * ((x-x0)**2) / width**2)
```

erreicht. Demnach ist die Form des Templates durch die beiden Parameter SIZE und WIDTH bestimmt. Im Folgenden werden Untersuchungen angestellt, durch die eine geeignete Kombination der beiden Parameter identifiziert werden kann. Hierfür wird die Kreuzkorrelationsfunktion für ein Beispielbild berechnet und iterativ eine Parametervariation durchgeführt. Durch die Variation der Parameter ergibt sich das unten dargestellte Kennfeld.

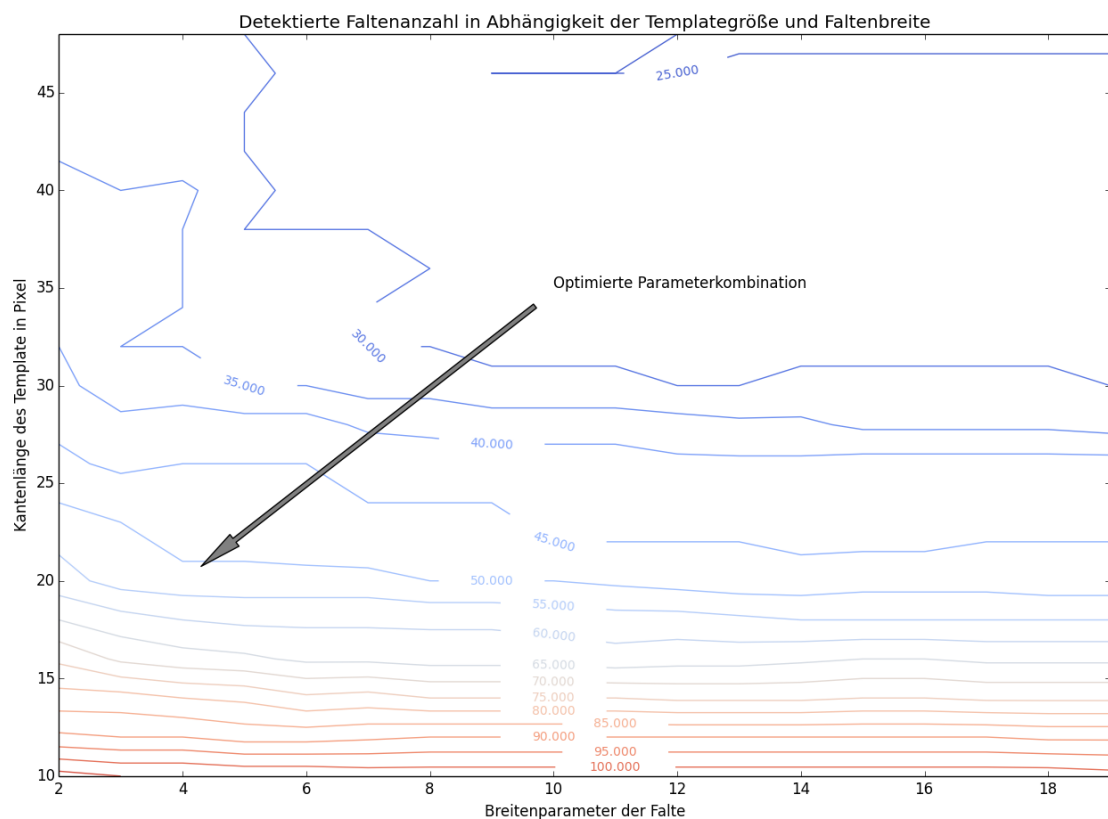


Abbildung J.1: Kennfeld zur Ermittlung einer geeigneten Templateform

Dabei fällt auf, dass sich die Breite der Modellfalte insbesondere bei einer hohen Anzahl von Umgebungspixeln auswirkt. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine hohe Anzahl von Umgebungspixeln dazu führt, dass ein hoher Anteil richtig positiver Klassifizierungen ermittelt wird.

Gleichzeitig steigt aber auch der Anteil falsch negativer Klassifizierungen. Insofern gilt es eine optimierte Kombination der Parameter Templategröße und Musterfaltenbreite zu finden.

Für die Bewertung der variierten Parameterkombination wird händisch die Faltenanzahl eines Ziehteils ermittelt, welches bei $F_{FH} = 3750 \text{ N}$, $T_S = 100 \text{ °C}$ und $T_{ZB} = 100 \text{ °C}$ hergestellt wurde. Hierfür konnte eine Faltenanzahl von 50 Falten für den betrachteten Bereich ermittelt werden. Es zeigt sich, dass dafür eine Vielzahl von Kombinationen in Frage kommt. Insbesondere im Intervall [17, 25] für die Kantenlänge des Musterbildes können derartige Faltenanzahlen berechnet werden. Entsprechend kann aus dem Kennfeld abgelesen werden, dass theoretisch alle gewählten Ausprägungen der Faltenbreite in Frage kommen.

Aus diesem Grund wird die Entscheidung auf der Grundlage der Betrachtungen zur Faltenbreite im Beispielbild getroffen. Durchschnittlich weisen die Falten eine Breite von zwei Pixeln im Kernbereich auf und laufen ähnlich der Normalverteilung zur Seite hin aus. Wird für den Parameter `WIDTH = 4` gewählt, kann eine Musterfalte berechnet werden, die dem Verhalten im Beispielbild gleicht, die Musterfalten aber auch so breit darstellt, dass Schiefstellungen der Falten im Musterbild in gewissen Grenzen berücksichtigt werden können. Demnach können aus dem berechneten Kennfeld für die Kantenlänge des Musterbildes 20 Pixel abgelesen werden. Somit werden 400 Pixel in der Umgebung eines Punktes (τ, υ) bei der Analyse durch die Kreuzkorrelationsfunktion betrachtet.

Anmerkung: Die an dieser Stelle durchgeführte Voruntersuchung dient lediglich der Ermittlung einer geeigneten Parameterkombination für die Breite der Musterfalte und die Größe des Musterbildes. Als optimal kann die gefundene Parameterkombination nur für das Beispielbild betrachtet werden. Zudem wird explizit darauf hingewiesen, dass die Voruntersuchung auf Grund des hohen Auswertungsaufwandes nur für ein Beispielbild durchgeführt wurde. Dieses wurde so ausgewählt, dass ein breites Spektrum von Falten (bzgl. Breite und Schiefstellung) im Bild enthalten ist. Weiterführende Untersuchungen können Aufschluss darüber geben, inwiefern sich die Parameterwahl auf die Erkennung von breiteren oder schmaleren Falten auswirkt. Diese sind jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

K. UML-Klassen- und Sequenzdiagramm des Softwaresystems

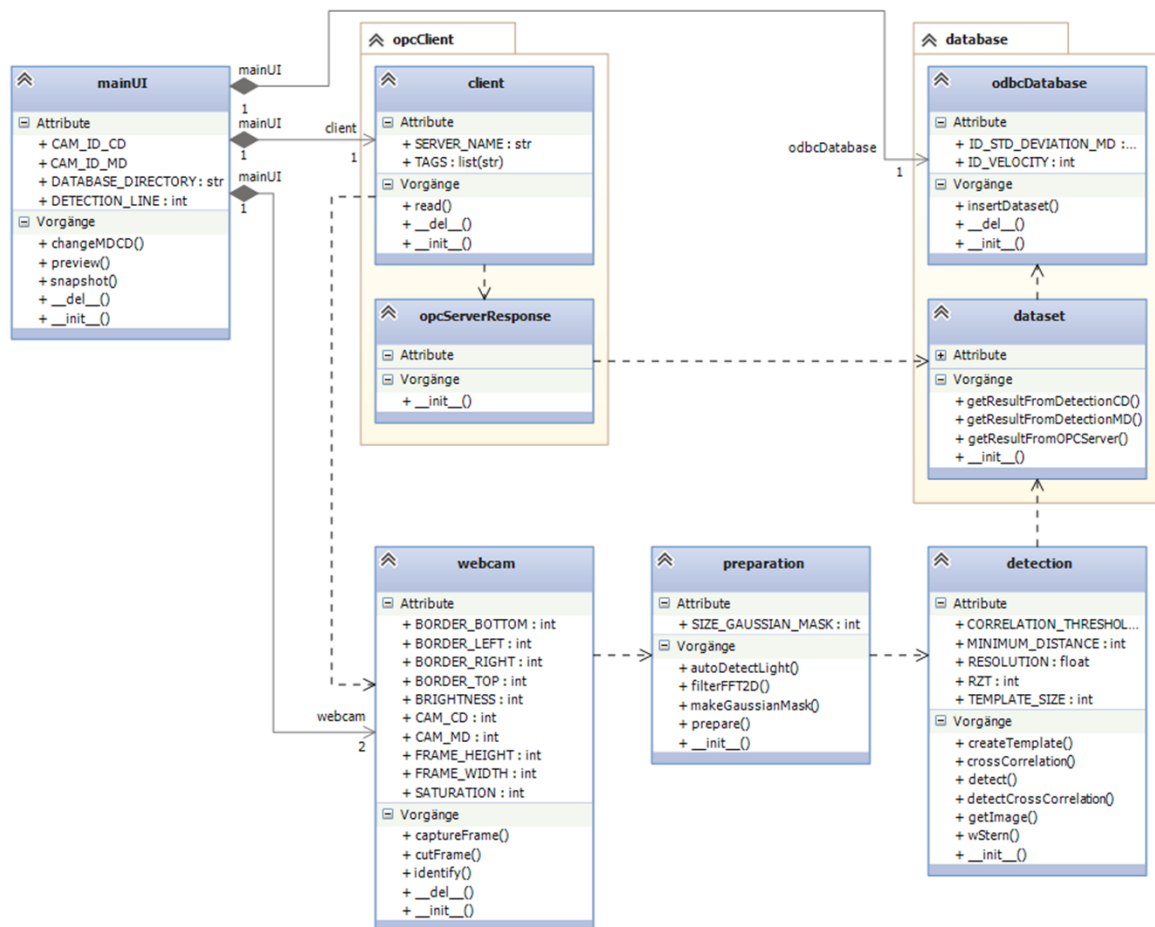


Abbildung K.1: Klassendiagramm des Softwaresystems

Abbildung K.1 stellt die Beziehung zwischen den entwickelten Klassen in einem UML-Klassendiagramm dar (vgl. [58]). Eine Dokumentation der Klassen, sowie die Beschreibung der Methoden und Attribute liegen der Arbeit im html-Format auf der beigelegten DVD bei.

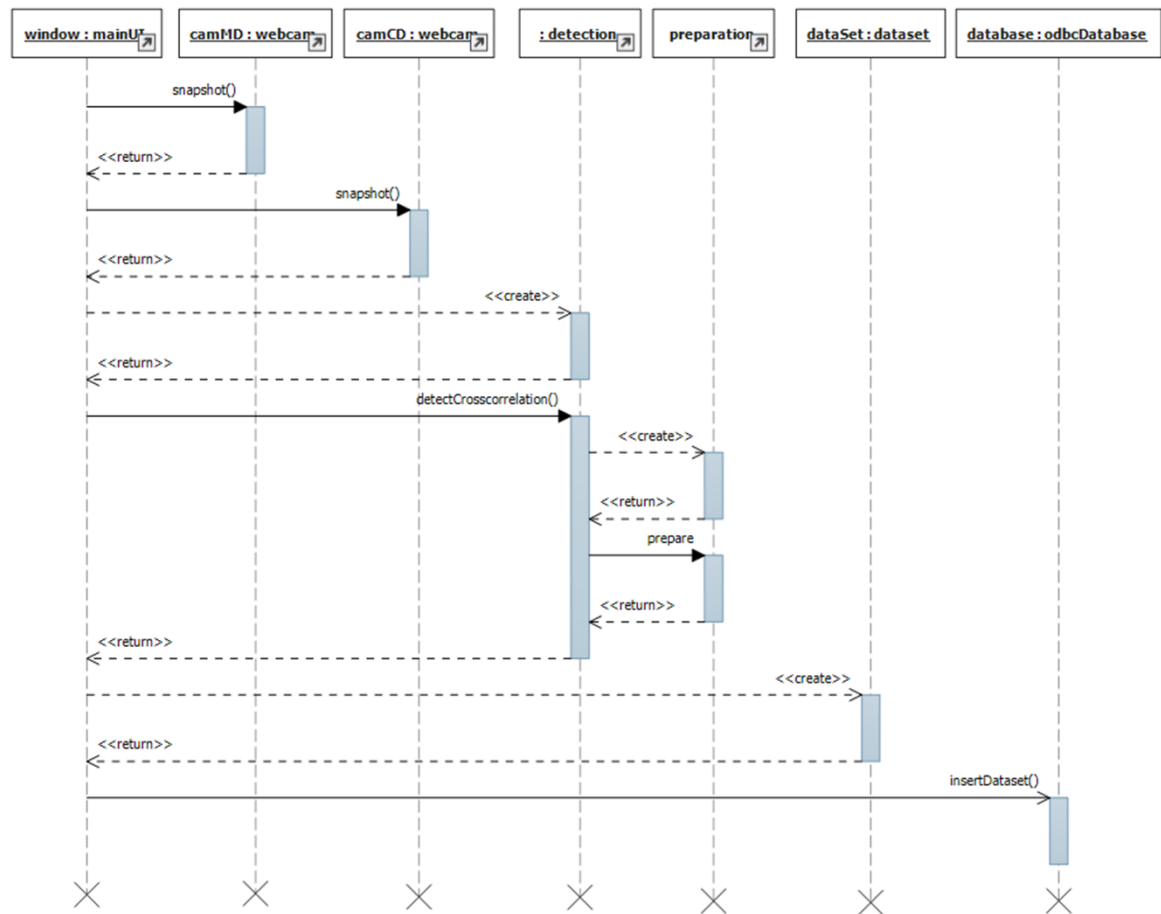


Abbildung K.2: Sequenzdiagramm des Mess- und Analyseablaufs

Wie in oben dargestellter Abbildung ersichtlich ist, wird der Analyseablauf durch die Benutzerschnittstelle gesteuert. Dargestellt ist der Analyseablauf aus dem laufenden Betrieb heraus, die Instanzen der Webcam-Klasse sind erzeugt und die Verbindung zur Datenbank ist bereits hergestellt. In Folge einer Benutzereingabe wird in beiden Instanzen der Webcam-Klasse die Methode `SNAPSHOT()` aufgerufen, die einen beschnittenen Frame zurückliefert und diesen als Original auf der Festplatte des Rechners speichert.

Für beide Frames erzeugt die Benutzerschnittstelle eine Instanz der Klasse `DETECTION.PY`, die ihrerseits je eine Instanz der Klasse `PREPARE.PY` beim Aufruf der `DETECTCROSSCORRELATION()`-Methode erzeugt. Daraufhin wird die `PREPARE()`-Methode dieser Instanzen aufgerufen und damit die Frequenzfilterung an den Frames durchgeführt. Aufbauend auf den gefilterten Frames führen die Instanzen der Klasse `DETECTION.PY` die Mustersuche durch Kreuzkorrelation durch.

Anhand der so berechneten Daten wird ein `DATASET.PY` Objekt erzeugt und initialisiert, welches mittels `INSERTDATASET()` an die `ODBCDATABASE`-Instanz übergeben wird. Diese fügt die Daten daraufhin in das Backend der Accessdatenbank ein.

L. Wichtige Teile des Quellcodes

Vorbemerkung zur Notation

Großgeschriebene Variablenamen deuten auf Konstanten hin, die auf Klassenebene definiert sind. Der Präfix „self.“ vor Variablen weist auf Klassenattribute hin. Modulimporte sind nicht aufgeführt.

Frequenzfilterung des Bildes

Die Methode `FILTERFFT2D()` der Klasse `PREPARE.PY` führt die spektrale Filterung eines Bildes durch. Zudem wird anschließend eine Histogrammspreizung zur Verstärkung der Kontraste durchgeführt und das vorbereitete Bild als Rückgabewert der aufrufenden Methode übergeben.

```
def filterFFT2D(self, img, gaussianMask):

    b = SIZE_GAUSSIAN_MASK
    r = 10

    #calculate 2d spectrum
    dft = cv2.dft(np.float32(img), flags = cv2.DFT_COMPLEX_OUTPUT)
    dftShift = np.fft.fftshift(dft)

    #create filtermask
    mask = np.zeros((self.height, self.width, 2), np.float32)

    mask[r:self.height - r, r:self.width - r, :] = 1

    mask[self.height/2 - b/2 : self.height/2 + b/2,
          self.width/2 - b/2 : self.width/2 + b/2, 0] = 1 - gaussianMask

    mask[self.height/2 - b/2 : self.height/2 + b/2,
          self.width/2 - b/2 : self.width/2 + b/2, 1] = 1 - gaussianMask

    #apply filtermask
    fshift = dftShift * mask
    fiShift = np.fft.ifftshift(fshift)

    #reverse fft
    imgBack = cv2.idft(fiShift)
    imgBack = cv2.magnitude(imgBack[:, :, 0], imgBack[:, :, 1])

    imgBack = (255 * imgBack / np.amax(imgBack)).astype('uint8')

    img = cv2.medianBlur(img, 3)

    lap = cv2.Laplacian(img, cv2.CV_16S, scale = 2)
    lap = cv2.convertScaleAbs(lap)

    for i in range(0, 2):
        imgBack = imgBack + lap

    return imgBack
```

Berechnung des Kreuzkorrelationskoeffizienten

Zur Berechnung des Kreuzkorrelationskoeffizienten wird die Methode `CROSSCORRELATION()` verwendet. Diese implementiert die in **Abschnitt 7.2.3** gezeigten Gleichungen.

```
def crossCorrelation(self, source, template):

    meanS = np.mean(source)
    meanT = np.mean(template)

    n = len(source)

    sigST = np.sum((source[:, :] - meanS) * (template[:, :] - meanT)) / n
    sigS = math.sqrt(np.sum((source[:, :] - meanS)**2)/n)
    sigT = math.sqrt(np.sum((template[:, :] - meanT)**2)/n)

    rohST = sigST / (sigS * sigT)

    return rohST
```

Zählung der Falten und Berechnung des mittleren Faltenabstandes

Wurde für alle Pixel der Verlauf der Kreuzkorrelationsfunktion berechnet, wird die Zählung und Abstandsbestimmung mit der folgenden Methode durchgeführt. Für die Zählung werden die in **Abschnitt 2.3.4** vorgestellten Verfahren für die Rückstellbreite und den Mindestabstand angewendet. Signifikante Maxima werden durch einen Schwellwert bestimmt.

```
def detectCrossCorrelation(self, line):

    corr = []
    pos = []
    pos.append(0)

    size = TEMPLATE_SIZE

    #calculate the crosscorrelation coefficient for each pixel in line, besides
    #the left/right border
    for x in range(size/2, self.width - size/2):
        corr.append(self.crossCorrelation(
            self.image[line - size / 2 : line + size / 2,
                x - size/2 : x + size/2],
            self.template))

    corr = np.array(corr)

    localMaxPos = argrelextrema(corr, comparator = np.greater_equal)

    count = 0

    #detect significant max values
    for maximumPos in localMaxPos[0]:
        #max higher than threshold?          AND far enough from last position?
```

```
        if corr[maximumPos] > CORRELATION_THRESHOLD and maximumPos - pos[-1] >
MINIMUM_DISTANCE:

            count = count + 1
            pos.append(maximumPos)

    dist = []

    #correct the detected positions and calculate the distances
    for i in range(0, len(pos) - 1):

        a = self.wStern(pos[i + 1]) * 1000
        b = self.wStern(pos[i]) * 1000

        dist.append(a - b)

    self.positions = pos
    self.count = count
    self.stdDeviation = np.std(dist)
    self.averageDistance = np.mean(dist)

    return (self.count, self.averageDistance, self.stdDeviation)
```

Datenbankinteraktion

Die strukturierten Datensätze werden wie folgt in die Datenbank eingefügt. Hierfür werden die Daten mit einem Zeitstempel versehen. Damit die Daten in die Datenbank eingefügt werden, wird zunächst ein neuer Versuch in der Datenbank angelegt und dessen Primärschlüssel bestimmt. Darauf aufbauend wird ein geeigneter SQL-Befehl erstellt, der die Daten in die richtigen Tabellen der Datenbank einfügt.

```
def insertDataset(self, dataset):

    sql = "INSERT INTO tblVersuche(mit_id_f, ver_datum, mat_id_f, ver_nummer,
        wer_id_f, vgr_id_f) VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?);"
    self.currentNumber += 1

    cursor = self.connection.cursor()

    today = date.today()
    cdate = today.strftime("%Y-%m-%d")
    ctime = time.strftime("%H:%M:%S")

    cursor.execute(sql, (self.currentEmployee,
        cdate + " " + ctime,
        self.currentMaterial,
        ctime + " - " + str(self.currentNumber),
        self.currentToolPair,
        self.currentTestGroup))

    cursor.commit()

    #Select last inserted ID
    id = cursor.execute("SELECT @@Identity").fetchone()
    cursor.commit()
    self.currentTestID = id[0]
```



```
#Insert results into the current test
sql = "INSERT INTO tblErgebnisse(ver_id_f, ziel_id_f, erg_betrag) VALUES
      (?, ?, ?);"

for key in dataset.results:
    if dataset.results[key] != -1:
        cursor.execute(sql, (self.currentTestID, key, dataset.results[key]))
        cursor.commit()

#Insert parameter into the current dataset
sql = "INSERT INTO tblEinstellungen(ver_id_f, par_id_f, ein_betrag) VALUES
      (?, ?, ?);"

for key in dataset.parameter:
    if dataset.parameter[key] != -1:
        cursor.execute(sql, (self.currentTestID, key,
                              dataset.parameter[key]))
        cursor.commit()

cursor.close()

logging.info("SUCCESS insert dataset into database")
```

M. Externe Python-Bibliotheken

Nachfolgend sind die Python-Bibliotheken Dritter beschrieben, die durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System verwendet werden. Diese sind sämtlich frei im Internet zugänglich. Unter Umständen bestehen innerhalb dieser Bibliotheken weiterführende Abhängigkeiten zu anderen Bibliotheken, welche hier nicht berücksichtigt werden. Für den Einsatz des Systems müssen sämtliche hier beschriebenen Bibliotheken auf dem Zielrechner installiert werden.

logging

Version: 0.5.1.2

Beschreibung: Die LOGGING-Bibliothek wird zur Anzeige von Statusmeldungen eingesetzt. Das Logging-Level sollte beim Betrieb der Software mindestens auf WARNING gesetzt sein, um unnötige Meldungen auszublenden. Auf diese Weise werden nur Warnungen und Fehler in der Konsole angezeigt.

numpy

Version: 1.8.0

Beschreibung: Das NUMPY-Modul wird für die effiziente Berechnung von Matrizen eingesetzt. Alle Bilder werden innerhalb des Programmsystems durch Datenstrukturen der NUMPY-Bibliothek repräsentiert. Des Weiteren werden auch für die Filtermatrix des Frequenzfilters und diverse Vektoren NUMPY-Datenstrukturen eingesetzt.

openCV

Version: 2.4.8

Beschreibung: Die OPENCV-Bibliothek bildet den Kern des Bilderverarbeitungssystem und der Kamerasteuerung. Neben den Funktionalitäten zur Bildspeicherung und –verarbeitung wird vor allem die Klasse VIDEOCAPTURE eingesetzt, über die sich die Webcams ansprechen lassen. OPENCV dient des Weiteren zur Berechnung der FFT der aufgezeichneten Bilder und deren Filterung.

OpenOPC

Version: 1.3.1

Beschreibung: OPENOPC dient der Kommunikation mit einem OPC-Server und wird daher für die Implementierung eines OPC-Clients eingesetzt. Dieser konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nur an einem OPC-Server-Simulator der Firma Matrikon getestet werden.

pydoc

Revision: 88564

Beschreibung: PYDOC wird für die automatisierte Dokumentation des Quellcodes eingesetzt. Die PYDOC-Bibliothek extrahiert aus den sogenannten DOCSTRINGS, besonders gekennzeichneten Textteilen dokumentierenden Inhalts im Quelltext, Quelltextbeschreibungen, Argumenttypen und –beschreibungen, sowie Rückgabewerte. Für jede Klasse wird auf diese Weise eine HTML-Datei erzeugt, die die Klasse, deren Methoden, Attribute, Argumente und Rückgabewerte beschreibt.

pyodbc

Version: 3.0.7

Beschreibung: PYODBC übernimmt den Aufbau der Verbindung mit einer ODBC-fähigen Datenbank, im Kontext der Arbeit eines MICROSOFT ACCESS 2013 Backends, und die Kommunikation mit der Datenbank. Auf diese Weise wird die Manipulation der Datenbank ermöglicht. Durch geeignete SQL-Befehle können Daten aus der Datenbank abgefragt, gelöscht und hinzugefügt werden.

PyQt4

Version: 4.11.4

Beschreibung: PYQT4 wird für die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche verwendet.

scipy

Version: 0.13.3

Beschreibung: SCIPY beinhaltet verschiedene Module für wissenschaftliches Rechnen. Für das vorliegende System werden Funktionen für die Signalglättung verwendet.

N. Anmerkungen zur Inbetriebnahme des Auswertungsmoduls

Bei der Installation des Gerätetreibers der Microsoft LifeCam Studio wird automatisch auch das sogenannte „Dashboard“ installiert. Dieses Zusatzprogramm erlaubt manuell Einstellungen an den Kameras einzustellen. Dies betrifft insbesondere die Aktivierung des Autofokus, die Festlegung einer festen Fokusebenenlage und die Einstellung der Kameraauflösung. Unter der Verwendung der externen Bibliothek `OPENCV` können ebenfalls Einstellungen an der Kamera vorgenommen werden. Dies betrifft insbesondere die Auswahl der gewünschten Auflösung. Es zeigt sich jedoch, dass diese Einstellungen ohne weiteres nicht wie vorgesehen getroffen werden können. Nach der Deinstallation des „Dashboards“ können jedoch auch durch `OPENCV` Kameraparameter beeinflusst werden. Auf diese Weise können durch die Klasse `VIDEOCAPTURE` Frames in fullHD Auflösung aufgezeichnet werden. Vermutlich resultiert dieses Verhalten daraus, dass das Dashboard Treiberressourcen blockiert und diese dadurch nicht für `OPENCV` zur Verfügung stehen.

Die ausgewählten Kameras sind dadurch zwar theoretisch in der Lage eine feste Fokusebenenlage einzustellen und somit die Messzeit drastisch zu reduzieren, jedoch erlaubt die Bibliothek `OPENCV` einer derartigen Einstellung nicht. Dieses Problem könnte jedoch dadurch umgangen werden, indem auf die Treiberbibliotheken (DLLs) zugegriffen wird. Dies erfordert jedoch ein erhebliches Grundverständnis für den Umgang mit diesen Bibliotheken und stellt gleichzeitig einen hohen Arbeitsaufwand dar. Insofern wurden im Rahmen dieser Arbeit die Einschränkungen bezüglich der Messzeit, die durch die Dauer der Fokussierung entstehen, in Kauf genommen.

O. Messdaten zur Validierung der Korrekturfunktion

Tabelle O.1: Messwerte zur Positionskorrektur in MD

Linie	Abstand/ mm	Position MD	Differenz/px	Korrektur MD	Differenz/px
-10	-50	365		123,7	
-9	-45	389	24	201,2	77,5
-8	-40	423	34	285,4	84,2
-7	-35	464	41	367,0	81,6
-6	-30	514	50	450,2	83,2
-5	-25	573	59	534,9	84,6
-4	-20	640	67	620,0	85,1
-3	-15	713	73	704,3	84,3
-2	-10	791	78	788,3	84,0
-1	-5	873	82	872,6	84,3
0	0	960	87	960,0	87,4
1	5	1043	83	1043,3	83,3
2	10	1126	83	1128,5	85,2
3	15	1204	78	1212,4	83,8
4	20	1277	73	1296,4	84,1
5	25	1344	67	1381,1	84,7
6	30	1405	61	1468,2	87,1
7	35	1455	50	1551,2	83,0
8	40	1497	42	1634,6	83,4
9	45	1529	32	1713,2	78,6
10	50	1553	24	1788,9	75,7

Tabelle O.2: Messwerte zur Positionskorrektur in CD

Linie	Abstand/ mm	Position CD	Differenz/px	Korrektur CD	Differenz/px
-10	-50	442		173,0	
-9	-45	467	25	263,7	90,7
-8	-40	500	33	351,0	87,3
-7	-35	542	42	438,2	87,2
-6	-30	594	52	526,9	88,7
-5	-25	651	57	610,0	83,1
-4	-20	720	69	698,7	88,7
-3	-15	795	75	785,9	87,2
-2	-10	876	81	873,3	87,4
-1	-5	960	84	959,7	86,4
0	0	1046	86	1046,0	86,3
1	5	1133	87	1133,4	87,4
2	10	1218	85	1220,8	87,5
3	15	1297	79	1306,1	85,3
4	20	1372	75	1393,3	87,2
5	25	1439	67	1479,3	86,0
6	30	1501	62	1569,8	90,6
7	35	1551	50	1655,6	85,8
8	40	1594	43	1745,7	90,0
9	45	1626	32	1831,4	85,7
10	50	1650	24	1919,0	87,7

Die als Linie bezeichneten Werte entsprechen einer Nummerierung der Markierungen, ausgehend von der mittleren Markierung nach links, bzw. rechts. Der reale Abstand der Markierungen beträgt 5 mm. Die Markierungen wurden durch einen Plotter hergestellt, der in der Lage ist mit hoher Genauigkeit zu zeichnen. Nichtsdestotrotz können geringe Abweichungen nicht ausgeschlossen werden, wodurch die Messungen unter Umständen verfälscht werden. Die Position entspricht der Pixelkoordinate der Markierung. Gemessen wurde, sofern möglich, die Mitte der Markierung. Die Differenz entspricht dem Abstand zweier aufeinander folgenden Markierungen. Gleiches wurde nach der Anwendung der Korrekturfunktion durchgeführt. Alle Werte, die auf Ergebnissen der Korrekturfunktion beruhen sind in den untenstehenden Tabellen auf eine Stelle gerundet.

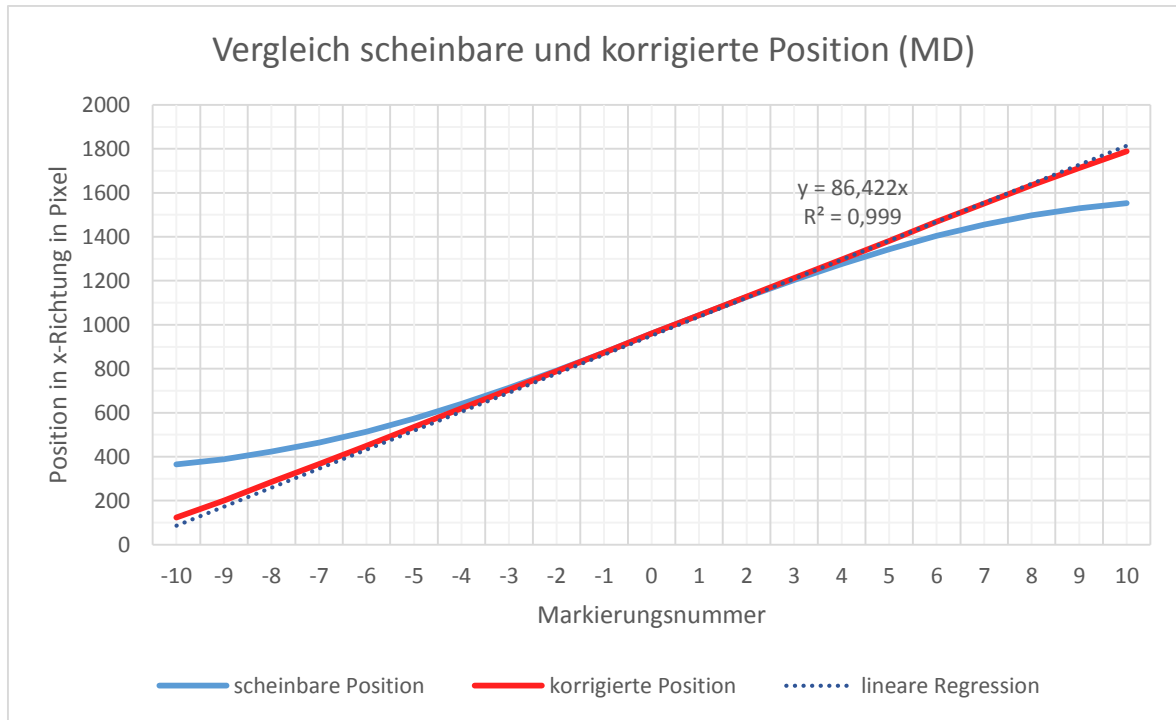


Abbildung O.1: Vergleich der scheinbaren und korrigierten Markierungsposition

Die untenstehenden Abbildungen zeigen wie sensitiv die Korrekturfunktion auf Variation des Ziehteilradius und des Kameraabstandes reagiert. In den Konturdiagrammen sind die korrigierten Markierungsabstände bei veränderlichem Ziehteilradius bzw. Kameraabstand aufgetragen.

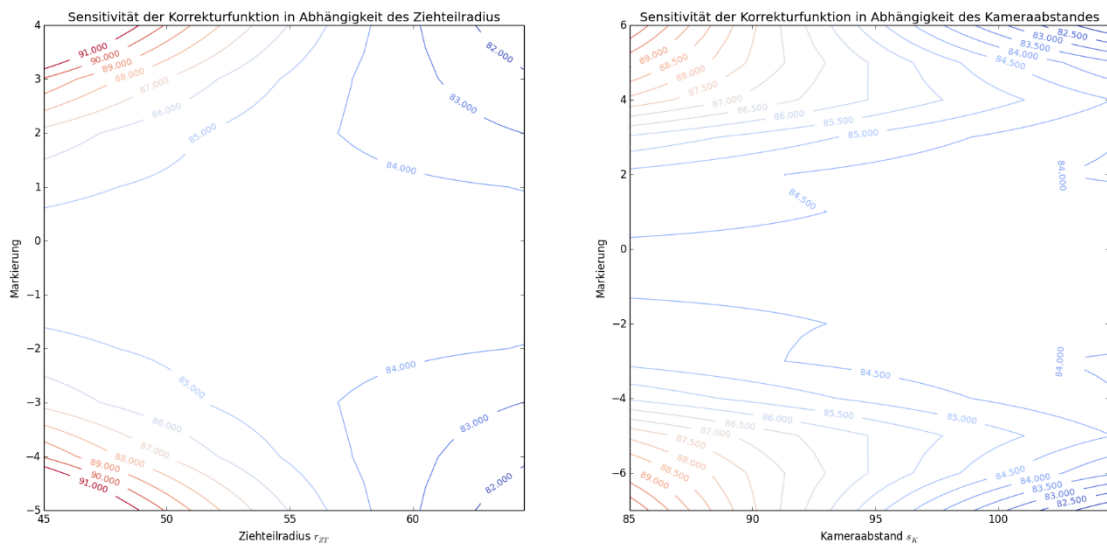


Abbildung O.2: Sensitivität der Korrekturfunktion bzgl. Ziehteilradius und Kameraabstand

P. Schwankung des Umgebungsklimas

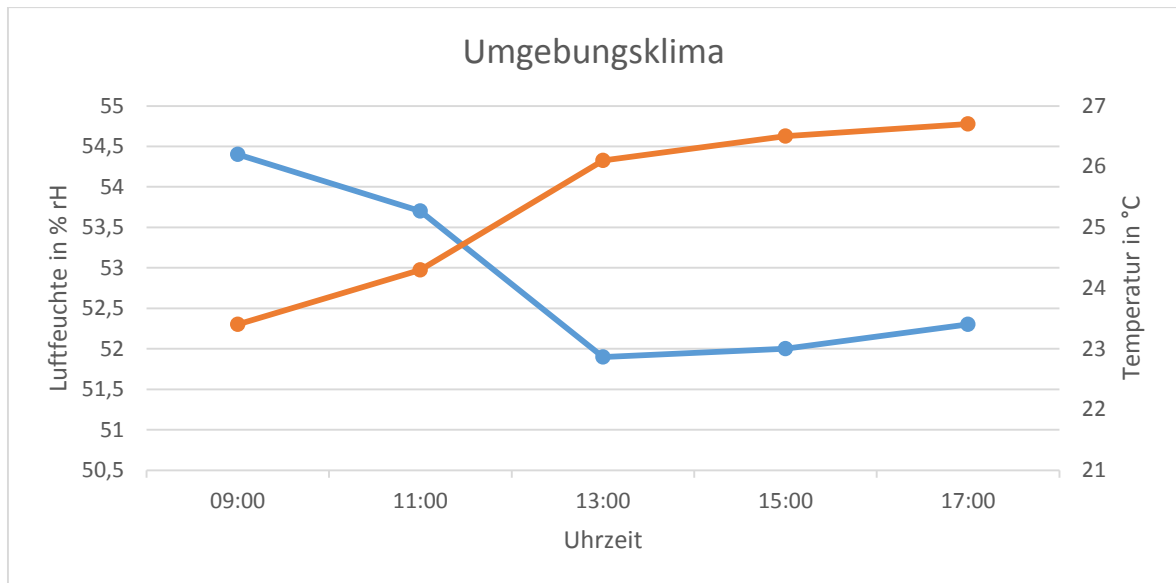




















Abbildung P.1: Umgebungsklima während der Versuchsdurchführung

Die Temperaturschwankungen entsprechen in etwa denen, die auch bei der Erstellung der Referenzmessungen aufgetreten sind. Es kann jedoch nicht nachvollzogen werden, zu welchen Zeiten die einzelnen Versuche durchgeführt wurden. Die Luftfeuchte schwankt bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen in einer Spanne von ca. 52 – 54,5 % rH, bei der Referenzmessung von ca. 46 – 58 % rH. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch diese klimatischen Schwankungen signifikante Abweichungen bei der Herstellung der Proben entstanden sind, die sich negativ auf die Vergleichbarkeit der Messungen auswirken.

Tabelle Q.1: Ergebnisse des t-Tests der Mittelwertabweichungen

	u	S = 95 %	S = 99 %	S = 99,9 %
Faltenanzahl MD	2,098	2,752 	3,833 	5,617 
Faltenanzahl CD	0,254	2,752 	3,833 	5,617 
Faltenabstand MD	7,354	2,752 	3,833 	5,617 
Faltenabstand CD	2,308	2,752 	3,833 	5,617 
Standardabweichung MD	0,006	2,752 	3,833 	5,617 
Standardabweichung CD	1,687	2,752 	3,833 	5,617 

Anmerkungen zu den Versuchsergebnissen

Prinzipiell wurden alle Versuchsergebnisse gerundet. Die Messdaten 1-8 entstammen den Versuchen der Referenzmessmethode [15], die Daten 9-16 wurden bei der Wiederholung der Versuchspunkte durch das Inline-Faltenauswertungsmodul ermittelt. Die Parameterstufen entsprechen denen aus **Abschnitt 8.2.2**.

Die Nachkommastellen für die Faltenanzahlen ergeben sich durch die Skalierung. Eine Rundung auf ganze Zahlen ist bei dieser Skalierung nicht sinnvoll. Bei der Referenzmessmethode wurden Zargenbereiche von $2 \cdot 90^\circ = 180^\circ$ untersucht. Das Inline-Faltenauswertungsmodul betrachtet jedoch nur einen Bereich von ca. 75° . Für den Vergleich der Messergebnisse wurden die inline gewonnenen Daten mit dem Faktor $180^\circ/75^\circ = 2,4$ skaliert.

Einstellungen am Versuchsstand

Neben den durch die faktorenstufen vorgegebenen Einstellungen wurden die nachfolgend aufgelisteten Einstellungen am Versuchsstand getroffen.

Tabelle Q.2: Einstellungen am Versuchsstand

Betriebsart:	Prägen
Haltezeit UT:	min. 10 s
Endposition Stempel:	- 135 mm
Ziehgeschwindigkeit:	- 20 mm/s
Kartondicke:	0,35 mm
Kamerasättigung:	100

R. Anmerkungen zur Beleuchtungssteuerung

Für die Steuerung der Beleuchtung durch einen Arduino kann mit diesem über die serielle Schnittstelle (USB) kommuniziert werden. Die verschiedenen Arduino-Modelle werden in der Programmiersprache C programmiert. Durch die Auswertung des `SERIAEVENT()` kann der Mikrocontroller auf Textbefehle reagieren und so beispielsweise einzelne LEDs ansteuern. Diese Textbefehle könnten beispielsweise folgende Struktur aufweisen: `[PINNUMMER]#[ON/OFF]`. Durch diese Struktur kann der Mikrocontroller leicht in die Lage versetzt werden einzelne GPIO-Pins anzusprechen. Für eine technische Umsetzung dieses Prinzips kann der nachfolgende Quellcode verwendet werden.

```
int ledpin = 1;
String pinNummer = „“;
String Status = „“;

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(ledpin, OUTPUT);
    instring.reserve(200);
}

void serialEvent() {
    Serial.flush();
    char c ;
    char seperator = '#';
    int sep;

    while (Serial.available()) {
        c = (char)Serial.read();
        instring += c;

        if (c == '\n') {
            instring = instring.substring(0, instring.length() - 1);
            Serial.println("in: " + instring);

            sep = instring.indexOf(seperator);
            pinNummer = instring.substring(0, sep);
            status = instring.substring(sep + 1, instring.length());

            instring = "";
        }
    }
}
```

Die Implementierung einer entsprechenden Methode zur Manipulation der GPIO-Zustände erlaubt dann die Steuerung der Beleuchtung. Eine entsprechende Erweiterung der Klasse `WEBCAM` im Python-Quellcode kann folgendermaßen vorgenommen werden

```
import serial
def captureFrame(self):
    ... #Initialisierung
    self.serial = serial.Serial(„COM1“, 115200)
    self.serial.write(„1#ON“)
    ... #Fotoaufzeichnung
    self.serial.write(„1#OFF“)
    self.serial.close()
```

Durch den Schaltungsentwurf in **Abbildung R.1** kann der unzureichende Strom der GPIO-Pins zur Relaissteuerung kompensiert werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Schaltkreis entsprechend dimensioniert werden muss und im Rahmen dieser Arbeit nicht getestet werden konnte.

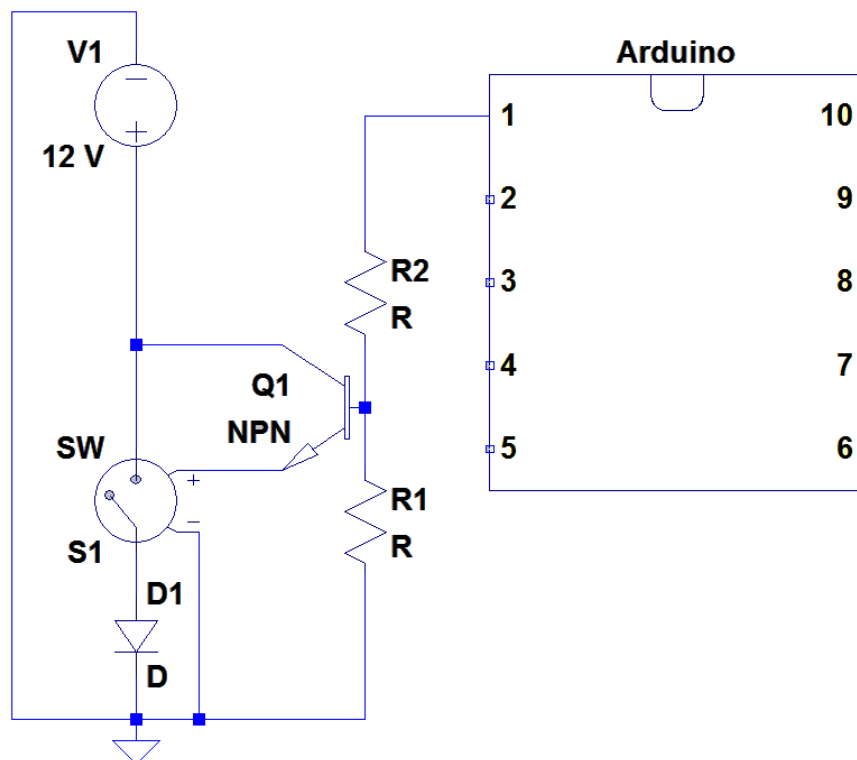


Abbildung R.1: Schaltungsentwurf zur Beleuchtungssteuerung

Dargestellt ist die Steuerung einer einzelnen Beleuchtungseinheit durch einen GPIO-Pin eines Arduinos. Prinzipiell lässt sich diese Schaltung auch an einem Raspberry Pi anwenden. Da der Strom,

den ein einzelner GPIO-Pin zur Verfügung stellen kann, unter Umständen nicht ausreichend ist, um den Steuerkreis eines Relais anzusprechen, wird dieser durch einen Transistor verstärkt. Der Strom aus dem Transistor spricht den Steuerkreis eines Relais an, welches anschließend den Leistungskreis schaltet und somit die Beleuchtungseinheit mit der Spannungsquelle verbindet. Untenstehende Tabelle listet die verwendeten Bauteile auf.

Tabelle R.1: Bauelemente der Beleuchtungssteuerung

Bezeichnung	Beschreibung
Arduino	Ein noch auszuwählendes Arduino-Modell, ggf. auch ein Raspberry Pi. Mikrocontroller, der programmgesteuert die Beleuchtungselemente ein- bzw. ausschaltet.
Q1	Transistor in der Grundsaltung als Schalter [59]. Dient der Verstärkung des GPIO-Stroms
R1, R2	Widerstände für die Transistor Grundsaltung
SW	Relais, spannungsgesteuerter Schalter
V1	12 V-Spannungsquelle, bspw. Netzteil
D1	LED-Streifen, Beleuchtungseinheit